INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2022 · nº 551 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA ERA DE LOS MAMÍFEROS

El asteroide que acabó con los dinosaurios creó un mundo en el que nuestros ancestros prosperaron

ASTROFÍSICA
La búsqueda astronómica de materia oscura

NEUROCOGNICIÓN
Cómo construye el cerebro nuestra noción del mundo

SOSTENIBILIDAD
Comida sana para la humanidad y el planeta

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

ILUSTRACIÓN DE PORTADA: BETH ZAIKEN

APUNTES


YOD67/ALAMY STOCK PHOTO

BIOLOGÍA

LA DEFENSA RESPLANDECIENTE DEL ESCARABAJO

Los colores mutables de algunos coleópteros advierten y camuflan a la par

A primera vista, lucir un caparazón de brillo iridiscente no sería la mejor estrategia para pasar inadvertido ante un ave hambrienta, pero en los últimos años los biólogos han demostrado que la iridiscencia (variación del color según el ángulo desde el que se mira) camufla a los escarabajos bupréstidos entre el follaje bañado por el sol. Un reciente estudio publicado en *Animal Behavior* otorga a la iridiscencia otra función protectora: las aves parecen desconfiar intuitivamente de esos virajes cromáticos.

Los autores afirman que es la primera vez que se demuestra que, al contrario que el brillo o los colores llamativos, la iridiscencia disuade a los depredadores. «De hecho es la variabilidad, el rasgo distintivo de la iridiscencia, la que constituye el principal elemento protector», explica Karin Kjernsmo, investigadora de la Universidad de Bristol y autora principal del estudio.

Para estudiar el modo en que las aves reaccionan a los colores variables de los escarabajos iridiscentes, ella y sus colaboradores colocaron cutículas brillantes del escarabajo *Sternocera aequisignata* junto a otros caparazones artificiales. Estos eran de color verde mate o brillante, o eran de colores cambiantes pintados con barniz mate. Los llenaron todos con gusanos de la harina y después se los ofrecieron a pollitos de gallina de un día.

Los pollos devoraron los gusanos situados bajo los caparazones mates, pero vacilaron ante los brillantes y los que variaban de color. En un estudio precedente se había comprobado que el brillo ahuyenta a los pájaros, pero no se sospechaba que los colores cambiantes surtieran ese efecto.

Johanna Mappes, bióloga de la Universidad de Helsinki que había participado en el estudio anterior pero no en este, alaba el modo en que el equipo de Kjernsmo tuvo en cuenta cada tipo de acabado de las cutículas, «sobre todo creando señales iridiscentes mates, realmente fabuloso».



PIXBOX77/ISTOCK

Escarabajo iridiscente de la especie *Sternocera aequisignata*.

El descubrimiento da a la iridiscencia una doble ventaja evolutiva: ayuda a ocultarse y al mismo tiempo ahuyenta a los depredadores que consiguen ver al escarabajo. Kjernsmo especula con que esto podría explicar por qué tantos insectos son iridiscentes: «Quedan protegidos en numerosas situaciones».

La hipótesis también explicaría por qué esos escarabajos adoptaron esa propiedad óptica en lugar de un color de advertencia más corriente, como un rojo o un naranja chillón, que suelen lucir los insectos venenosos. En la especie de bupréstido estudiada, que carece de defensas químicas, la atención extra que captan los colores aposemáticos corrientes no merecería la pena; es mejor confundirse con el entorno cuando sea posible.

Habrá que investigar por qué la iridiscencia disuade a las aves. Los autores proponen que tal vez el escarabajo esté imitando a otros insectos provistos de defensas químicas. O quizá los cambios de color confunden a los depredadores, que no saben si tienen ante sí un escarabajo inofensivo o venenoso.

Kate Golembiewski

ETOLOGÍA

ABEJAS SIN *SEX APPEAL*

Un pesticida común hace que las abejas macho resulten menos atractivas para las hembras

Una sustancia que se usa para proteger los cultivos parece producir un inesperado efecto secundario: como si fuera el opuesto de un buen perfume, provoca que ciertas abejas dejen de atraer a sus parejas reproductoras, lo que podría amenazar las poblaciones de estos importantes polinizadores.



CEREZ/EYEEM/GETTY IMAGES

El fenbuconazol, un pesticida común, está catalogado como bastante seguro para las abejas, puesto que ataca de manera específica a los hongos (muy diferentes desde el punto de vista taxonómico) y las abejas expuestas no suelen morir directamente. Otros trabajos previos habían revelado que los insecticidas considerados «de bajo riesgo» para las abejas podían afectar a su desarrollo, hábitos alimenticios y aprendizaje. Aunque no se habían realizado estudios tan exhaustivos con fungicidas como el fenbuconazol, no se esperaba que resultaran perjudiciales.

El ecólogo de la Universidad de Würzburg Samuel Boff y sus colaboradores, autores de un nuevo trabajo publicado en *Journal of Applied Ecology*, pretendían averiguar si el fenbuconazol (que suele emplearse en cultivos de trigo, manzanas y uvas) podía afectar a las abejas de una forma sutil. «Hicimos el estudio porque ese fungicida se usa mucho», explica Boff. «No esperábamos hallar ningún efecto.»

Pero observaron uno sorprendente: la exposición al fenbuconazol alteró dos componentes distintos del ritual de cortejo de las abejas de la especie *Osmia cornuta*. Los machos usan sugestivas vibraciones de su tórax y su olor corporal para atraer a sus compañeras, pero la exposición al fungicida disminuyó la frecuencia de las vibraciones torácicas (quizá porque afectó a las contracciones musculares) y modificó el perfil químico de los machos y, en consecuencia, su olor. Estos cambios parecieron disuadir a las hembras, que preferían a los machos no expuestos. Los autores creen que el rechazo de las hembras podría reducir las poblaciones de esta especie de abejas y de otras con sistemas de apareamiento similares.

El estudio «es importante porque proporciona un mecanismo para explicar el declive de las abejas», señala Susan Willis Chan, investigadora apícola de la Universidad de Guelph ajena al estudio. «Es un gran artículo.» Boff confía en que los hallazgos de su equipo promuevan análisis más rigurosos sobre el uso de fungicidas, que podrían derivar en métodos alternativos para el control de plagas.

Darren Incorvaia

CIENCIAS DEL ESPACIO

PLANTAS LUNARES

Las semillas sembradas en muestras de regolito lunar germinan, pero no prosperan

Al laboratorio de Robert Ferl llegó una sencilla caja de UPS con doce gramos de material lunar. Ferl, experto en horticultura de la Universidad de Florida, llevaba más de un decenio esperando ese momento. La pequeña caja con timbre de la NASA contenía algunas de las últimas muestras selladas de polvo lunar, o regolito, recogidas por los astronautas de las misiones Apolo. Ferl aún recuerda cómo le temblaban las manos cuando las cogió, a pesar de que había estado meses practicando. «Resulta extraño y da miedo», comparte. «¿Qué pasa si se te caen?» Ferl y su equipo estaban a punto de convertirse en los primeros investigadores en cultivar plantas en suelo lunar real.

El experimento se enmarca en el auge de la investigación lunar impulsado por el programa Artemisa de la NASA, que pretende enviar seres humanos a nuestro satélite a lo largo de esta década. El objetivo es crear allí un puesto avanzado, a modo de ensayo general para futuros viajes a Marte. Y los científicos prevén que esas misiones más largas requerirán una fuente sostenible de alimentos. «Toda la exploración humana se ha basado en la capacidad de mantener alimentadas a las tripulaciones», subraya Gil Cauthorn, científico de la Iniciativa Internacional de Investigación en Astrobotánica que trabaja en Osaka.

El reciente trabajo de Ferl, que se ha publicado en *Communications Biology*, supone un importante primer paso en esa dirección y demuestra que las plantas pueden crecer en el suelo lunar. Sin embargo, las plántulas no llegaron a prosperar, lo que indica que los futuros agricultores lunares deberán fertilizar el regolito.

Para poner a prueba el suelo lunar, Ferl y su equipo dividieron las muestras en 12 macetas de 900 miligramos cada una y plantaron en ellas semillas de *Arabidopsis thaliana*, una especie resistente de la misma familia que la mostaza y la col. Todas germinaron con éxito, pero las plántulas tuvieron dificultades en la siguiente fase de crecimiento: la creación de un sistema radicular sano. Los brotes crecían con lentitud y mostraban evidentes signos de estrés, no solo



UF/IFAS/TYLER JONES

Ejemplares de *Arabidopsis* plantados en suelo lunar simulado (*izquierda*) y real (*derecha*).

por el elevado nivel de sal y metales del regolito, sino también por su falta de agua y microbios.

Los microbios son componentes muy importantes de cualquier suelo dedicado al cultivo de plantas. «Desempeñan un papel fundamental», apunta Gretchen North, ecóloga especializada en fisiología vegetal del Colegio Occidental de Los Ángeles ajena al estudio. Las bacterias simbióticas ayudan a las plantas a regular las hormonas del crecimiento, combatir los patógenos, minimizar el estrés ambiental y absorber nutrientes esenciales como el nitrógeno. Sin embargo, el regolito lunar carece de un microbioma natural, por lo que las plantas tuvieron problemas para captar los nutrientes y gestionar el estrés.

Además, el regolito puede volverse tan denso como el cemento cuando se le añade agua. «Es difícil lograr que ese material no se convierta en roca», repara Cauthorn, que tampoco participó en el nuevo estudio.

Añadir nutrientes o compost para promover la proliferación de microbios podría mejorar las expectativas de las plantas. Y North, que ha estudiado el crecimiento vegetal en condiciones marcianas simuladas, sospecha que la superficie de la Luna es más fértil que el suelo del planeta rojo. Y es que el regolito marciano está repleto de perclorato, un compuesto oxidante que puede ser perjudicial para plantas y animales.

Ferl espera seguir estudiando cómo podría arraigar la vida en los estériles suelos extraterrestres, con miras a impulsar las perspectivas de la humanidad fuera de la Tierra y a mejorar la agricultura en los suelos con poca agua y nutrientes de nuestro planeta. De momento, él y sus colegas se sienten agradecidos por poder experimentar con una de las pocas muestras de suelo lunar que tenemos. «Para nosotros ha sido, y sigue siendo, un auténtico privilegio», asegura.

Joanna Thompson

VISIÓN

VISIÓN *POST MORTEM*

Restaurada la actividad eléctrica en retinas humanas de cadáveres

Pocos hechos biológicos parecen tan irreversibles como la muerte cerebral. Siempre se ha supuesto que, con la muerte, las neuronas mueren con el individuo. Pero un novedoso estudio sobre la membrana repleta de neuronas del ojo está comenzando a cambiar ese dogma.

En el nuevo trabajo, los investigadores restituyeron la actividad eléctrica de retinas humanas (el tejido nervioso fotosensible situado en la parte posterior del globo ocular que está conectado con el cerebro, *en la fotografía*) procedentes de donantes fallecidos poco antes. Este logro, dado a conocer en *Nature*, mejorará el estudio de las enfermedades oftalmológicas, como la degeneración macular senil, una importante causa de deterioro de la visión y de ceguera. También podría sentar las bases para revivir otros tejidos nerviosos y, tal vez algún día, hacer posibles los trasplantes de retina.

La mayoría de los estudios en este campo se hacen con animales, básicamente con ratones.



STANLEY45/GETTY IMAGES

Primer plano de la retina humana

Pero la retina de este roedor carece de mácula, una región esencial del ojo humano que nos dota de agudeza visual, por lo que no es un modelo ideal. Y el estado del tejido ocular obtenido en las autopsias impide estudiar su funcionamiento, pues casi siempre han pasado demasiadas horas.

Así que, cuando en 2019 investigadores de la Universidad Yale demostraron que era posible restaurar una actividad eléctrica rudimentaria en el cerebro de cerdos sacrificados, el logro inspiró a Frans Vinberg, experto en visión de la Universidad de Utah, Anne Hanneken, cirujana retiniana del Instituto Scripps, y sus colaboradores la idea de hacer lo mismo en la retina.

Primero averiguaron cuánto tiempo siguen transmitiendo impulsos nerviosos las retinas de los ratones sacrificados: observaron que lo hacían hasta tres horas después de la muerte, y comprobaron que la falta de oxígeno era el principal responsable de la pérdida irreversible de funcionalidad. Luego pasaron a estudiar los ojos de donantes obtenidos poco después de la muerte cerebral o cardíaca gracias a la cooperación con una entidad de donación de órganos. Eran transportados al laboratorio en un contenedor que suministraba oxígeno y nutrientes, y allí expusieron la retina a luz tenue al tiempo que medían la actividad eléctrica generada en la membrana. Lograron restablecer esa actividad en las células fotosensibles, llamadas fotorreceptores, así como en las neuronas con las que están enlazadas, siempre que los ojos se hubieran extraído como máximo en los 20 minutos posteriores a la muerte. Por supuesto, Hanneken aclara que los ojos no pudieron ver al no estar conectados a un cerebro. Pero los resultados indican que no solo se consiguió restaurar células retinianas aisladas, sino también la comunicación entre ellas.

«Lo más fascinante de todo es que podría convertirse en un modelo para el estudio de la fisiología visual en la retina humana, tanto en la salud como en la enfermedad y durante el envejecimiento», afirma Joan Miller, jefa de oftalmología en el Hospital de Oftalmología y Otorrinolaringología de Massachusetts y catedrática de oftalmología de la Escuela de Medicina de Harvard, que no ha participado en el estudio. Sin ir más lejos, la investigación de la degeneración macular ha resultado difícil hasta la fecha por no poder disponer de tejido ocular vivo de origen humano. Gracias a esta técnica innovadora, a partir de ahora sería posible estudiar los ojos de donantes con y sin ese trastorno para emprender la búsqueda de tratamientos nuevos.

Los resultados del equipo apuntan a la posibilidad de revivir otros tipos de tejido nervioso. «La retina es una ventana al cerebro, de modo que, si se puede restituir la comunicación en la retina *post mortem*, me pararía a pensar qué tipo de comunicación sería recuperable en el cerebro», opina Hanneken. El estudio también abre la puerta a los trasplantes de retina, aunque, según los investigadores, todavía queda muy lejos en el futuro.

Este nuevo trabajo ilustra la importancia que revisten para la ciencia básica los tejidos donados. Vinberg concluye: «Estamos sinceramente agradecidos a los donantes y a sus familias. Esperamos que estos resultados animen a más personas a dar el paso y leguen sus órganos y tejidos a la ciencia».

Tanya Lewis

ECOLOGÍA

GEOLOCALIZADOR DE OSTRA

Los sonidos de los crustáceos atraen a las larvas de este bivalvo, que construyen nuevos arrecifes

THOMAS FUCHS

Los arrecifes de ostras cubrían antaño gran parte del lecho marino, donde filtraban el agua, estabilizaban las orillas y brindaban refugio a una rica variedad de seres vivos, pero la actividad pesquera de los arrastreros ha destruido la mayoría de ellos en todo el globo durante los últimos dos siglos. Ahora, unos investigadores de la Universidad de Adelaida dan a conocer en un artículo del *Journal of Applied Ecology* un hecho curioso que podría ayudar a reconstruir esas formaciones: las crías de ostra siguen los sonidos de los camarones y los langostinos.

Las larvas microscópicas de la ostra australiana *Ostrea angasi* vagan arrastradas por las corrientes y nadan con sus cilios en busca de una superficie firme a la que se fijarán de por vida, normalmente un arrecife floreciente levantado por las conchas de otras ostras. Si no disponen de un arrecife cerca, flotan inermes sobre el fondo arenoso y solo unas pocas afortunadas encontrarán un hogar en rocas dispersas. Los especialistas en conservación han intentado crear de cero arrecifes sumergiendo rocas calcáreas para que se asienten en ellos las larvas, pero la mayoría permanecen perdidas en el mar.

En estudios anteriores se había observado que otros seres vivos se dirigen hacia los sonidos que emiten los ecosistemas sanos, cada vez menos frecuentes por el empobrecimiento de los arrecifes y el rumor de los buques, que domina el paisaje sonoro del mar. Las ostras no poseen oídos pero perciben las vibraciones, así que el equipo se preguntó si las larvas no estarían siguiendo una baliza acústica propia: los crujidos de las pinzas de los langostinos y otros crustáceos.

Esos habitantes de los arrecifes chasquean sus pinzas para lanzar chorros de agua que aturden a las presas, produciendo una cacofonía constante de 210 decibelios de intensidad, una potencia equivalente a la de un concierto de rock. En el laboratorio y en un experimento en mar abierto, comprobaron que las larvas de ostra nadan hacia las grabaciones del sonido de los langostinos y se asientan sobre las superficies firmes cercanas. Las larvas localizan con dificultad esas superficies si no se emite el sonido o el rumor de los barcos causa interferencias.

Los investigadores dicen que atraer a las ostras hacia arrecifes artificiales puede ofrecer una alternativa a otras medidas laboriosas y costosas, como enviar buceadores para transportar las larvas a su nuevo hogar. «La cría conlleva un coste y un esfuerzo», señala Terry Palmer, científica marina de la Universidad de Texas que trabaja en la conservación de estos bivalvos pero no ha participado en el estudio. En su opinión, el nuevo método sería útil si se combinase con el aporte de superficies idóneas para la creación de los arrecifes, sobre todo en las zonas donde la fauna escasea.

Y esa técnica acústica podría servir a más animales que las ostras. Brittany Williams, bióloga marina de la Universidad de Adelaida y autora principal del estudio, afirma: «Son los elementos constructivos de los arrecifes australes». Allá donde van las otras, les siguen más formas de vida. Aunque atraer a las larvas a unos escollos artificiales desprovistos de vida para que se instalen se podría ver como una treta cruel y de corto recorrido, el resultado está asegurado: el plancton y las algas de los que se alimentan es ubicuo, por lo que no mueren de inanición mientras esperan que el resto de la comunidad colonice el arrecife.

Kate Golembiewski

PALEONTOLOGÍA

EL DESPEGUE DE LOS PTEROSAURIOS

Nuevos indicios sugieren que estos reptiles alados podían emprender el vuelo desde el agua

Desde que se descubrieron los fósiles de pterosaurios, hace más de dos siglos, los paleontólogos se han preguntado cómo alzaban el vuelo estos reptiles de aspecto desgarbado. En los últimos tiempos, los expertos se han centrado en la hipótesis del «despegue cuadrúpedo», según la cual los pterosaurios se balanceaban adelante y atrás sobre sus extremidades, para elevarse con un movimiento similar al de un salto con pértiga, ya fuera desde la tierra o desde el agua. Hasta ahora no se habían obtenido pruebas directas de esta técnica, pero un pequeño pterosaurio hallado en las rocas jurásicas de Alemania podría ayudar a esclarecer el misterio.

Como describen Michael Habib, paleontólogo del Museo de Historia Natural de Los Ángeles, y sus colaboradores en *Scientific Reports*, el fósil, que es del tamaño de un gorrión y se encuentra en un estado de conservación excepcional, presenta

huesos e impresiones de la piel de un género de pterosaurios llamado *Aurorazhdarcho.* Los paleontólogos aplicaron una técnica conocida como fluorescencia inducida por láser para detectar los tejidos fosilizados, que incluían una membrana alar y los pies palmeados. El análisis de estas estructuras permitió a los investigadores determinar cómo las usaban los pterosaurios para elevarse en el aire.

Algunos trabajos previos indican que los pterosaurios no eran buenos nadadores, señala Habib, así que no es probable que los tejidos blandos del fósil estuvieran orientados a la natación: «Tiene más sentido interpretarlos como adaptaciones para el despegue acuático». Estas estructuras ofrecen la primera prueba física de que los pterosaurios podían despegar valiéndose de un sistema de lanzamiento cuadrúpedo, asegura; hasta ahora, los mejores indicios provenían de los modelos biomecánicos de esqueletos. Las impresiones de piel en las extremidades sugieren que, al plegarse, las alas del pterosaurio lo ayudaban a elevarse desde la superficie del agua. Los investigadores hallaron que las alas y las patas palmeadas habrían bastado para impulsar al animal desde la posición de reposo.

La mayoría de las aves modernas emplean sus musculosas patas para alzar el vuelo. Pero los pterosaurios no poseían las mismas proporciones y habrían actuado de forma distinta, según Natalia Jagielska, paleontóloga de la Universidad de Edimburgo ajena al estudio. Saber que puede haber tejidos blandos de este tipo en el registro fósil, añade, es «un buen motivo para examinar con técnicas láser otros fósiles bien conservados y comprobar si nos cuentan una historia distinta».

Riley Black



FUENTE: «QUADRUPEDAL WATER LAUNCH CAPABILITY DEMONSTRATED IN SMALL LATE JURASSIC PTEROSAURS», MICHAEL PITTMAN ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 12, ART. 6540, ABRIL DE 2022

Fósil que muestra el esqueleto y los tejidos blandos de un pterosaurio.

MEDIOAMBIENTE

SALVAR LOS OLIVARES

Un algoritmo de inteligencia artificial aborda una desastrosa enfermedad del olivo

Un agresivo patógeno que aniquila los olivos podría causar pérdidas de miles de millones de euros en Italia en los próximos 50 años. La bacteria *Xylella fastidiosa* (llamada así por lo complicado que resulta cultivarla en el laboratorio) se detectó en el sur de ese país en 2013. En la Unión Europa está catalogada como «organismo de cuarentena», y los árboles infectados, algunos de ellos centenarios, deben talarse para frenar la propagación de la enfermedad, que afecta a lugares como la región italiana de Apulia.

«Estamos obligados a destruir las plantas infectadas por *Xylella*, pero los habitantes de Apulia se oponen», señala Valeria Scala, fitopatóloga del Consejo de Investigación Agrícola y Análisis de la Economía Agraria de Italia. Como científicos, prosigue, «estamos entre dos mundos». Por ello, Scala y sus colaboradores buscan formas de combatir *Xylella* sin cortar todos los árboles infectados. Por medio de un algoritmo de aprendizaje automático que examina los datos metabólicos de los árboles, tratan de averiguar cuáles son más vulnerables a la enfermedad y


COSIMO CALABRESE/GETTY IMAGES

cómo seleccionar ejemplares para someterlos a tratamiento en vez de talarlos. El trabajo se detalla en *Frontiers in Plant Science*.

Xylella genera ácidos grasos complejos llamados lípidos, los cuales actúan como moléculas de señalización, y los árboles también producen sus propios lípidos en respuesta a la infección. Los investigadores recogieron muestras de ramas de 66 árboles y usaron su algoritmo para comparar los perfiles lipídicos y otros datos, como la variedad del árbol, si este estaba infectado o si había sido tratado con Dentamet, una mezcla metálica que alivia los síntomas, pero no los cura.

El equipo halló que la concentración de una cierta clase de lípidos era mayor en los árboles infectados. Y los olivos enfermos de una variedad autóctona de la castigada Apulia presentaban niveles más elevados de esos lípidos que los de otra variedad muy extendida y conocida por su resistencia. En ambos casos, el tratamiento con Dentamet redujo la concentración de lípidos en los individuos atacados por la bacteria.

Massimo Reverberi, fitopatólogo molecular de la Universidad La Sapienza de Roma y coautor del estudio, señala que las dos variedades de árboles se comportaron como personas que combaten la gripe con sistemas inmunitarios más o menos fuertes. «Nuestra hipótesis es que, en cierto sentido, se trata de algo "personal"», manifiesta. El desarrollo del algoritmo quizás permita a los investigadores diagnosticar la gravedad de la infección midiendo la concentración de lípidos. Los casos leves podrían tratarse con Dentamet y solo habría que sacrificar los ejemplares más afectados. Además, conocer cómo responden los árboles a la infección por *Xylella* también ayudará a buscar nuevos tratamientos y a identificar variedades de árboles más resistentes, añade Scala.

Francesco Paolo Fanizzi, químico de la Universidad de Salento ajeno al estudio, considera que es «un método prometedor que podría aliviar la difícil situación económica que sufre el sur de Apulia». Y subraya que «tenemos que coexistir con las bacterias».

Maddie Bender

NEUROCIENCIA

APRENDER DURANTE EL SUEÑO

La actividad del cerebro durmiente se vincula con una mejor retentiva

ASLAN ALPHAN/ISTOCK

Las peculiares ráfagas de actividad cerebral que tienen lugar mientras dormimos, llamadas ejes o husos del sueño, han sido vinculadas desde hace tiempo con la consolidación de los recuerdos recién creados. Ahora, empero, un nuevo estudio ha conseguido enlazar esos picos con lo que aprendemos durante la vigilia.

Esas ráfagas eléctricas que adquieren la forma de trazos altos y agudos en el encefalograma tienden a surgir en las primeras fases del sueño, cuando la actividad cerebral es por lo demás baja. Un estudio publicado en *Current Biology* muestra que los husos del sueño aparecen sobre todo en ciertas regiones cerebrales que se habían activado antes, cuando los participantes estaban despiertos aprendiendo una tarea asignada. Los husos más intensos de esas zonas se interre-

lacionan con un recuerdo más fiel al acabar el sueño.

«En cada participante logramos vincular las regiones cerebrales exactas que empleó para aprender con la actividad de los husos durante el sueño», explica el autor principal del estudio, Bernhard Staresina, especialista en neurociencia cognitiva de la Universidad de Oxford.

Él y su equipo diseñaron una tarea que han llamado la «arena de la memoria», en la que cada participante tenía que memorizar los lugares que ocupaba una serie de imágenes en un círculo. Mientras lo hacían, midieron su actividad cerebral con un EEG a través de electrodos aplicados en la cabeza. Los participantes se echaron una siesta de dos horas, al término de la cual memorizaron una nueva secuencia antes de intentar colocar las imágenes en el orden original que habían memorizado antes de dormir.

Durante la siesta se registraron husos más grandes en las regiones del cerebro que habían permanecido activas durante la tarea de memorización que precedió al sueño, zonas que difirieron en cada participante. Esto indica que el patrón de los husos no está programado por defecto en ciertas partes del cerebro, sino que va ligado a los patrones de pensamiento personales. De igual modo, se constató que los participantes que presentaron husos del sueño más marcados en las zonas del cerebro implicadas en la memorización recordaron mejor las posiciones de las imágenes después de la siesta.

Investigaciones precedentes habían señalado que los husos desencadenan cambios en el cerebro que inician el proceso de consolidación y refinamiento de la memoria, en parte mediante el control de la entrada de calcio en determinadas células. Los autores afirman que su estudio es el primero en que se ha medido directamente la actividad cerebral durante el aprendizaje y que avala ese vínculo, además de ser el primero en que se ha asociado la buena retentiva con los husos más marcados situados en zonas que habían permanecido activas durante el aprendizaje, aunque matizan que eso no significa que los husos mejoren directamente la memoria. Staresina explica que en trabajos futuros se examinarán los husos y otra actividad del hipocampo, el nodo principal de la memoria en el cerebro.

Lourdes DelRosso, investigadora del sueño y pediatra de la Universidad de Washington, ajena al estudio, opina que «es un artículo convincente, que avala el papel de los husos en la memoria». Espera que el estudio de estos se extienda a las personas con trastornos del aprendizaje y de la atención, como el TDAH o la dislexia.

Rebecca Sohn

GENÉTICA

EL COLOR TIENE UN COSTE

Un pez cavernícola renunció a la pigmentación a cambio de un metabolismo más economizador

Astyanax mexicanus es un pez cavernícola mexicano que habita en un ambiente hostil como pocos: grutas oscuras y de aguas gélidas que se inundan cada año dando pie a una breve época de abundancia separada por largos períodos de escasez. Incoloro y ciego, engorda con facilidad, mantiene una concentración de glucosa elevada en la sangre y duerme muy poco. A pesar de las difíciles condiciones, vive una existencia longeva, con frecuencia de quince años. Un reciente estudio genético revela que la pérdida del color no sería una mera consecuencia indirecta de la evolución, sino que habría ayudado a este pez intrépido a generar una energía vital.

Investigadores del Instituto Stowers de Investigaciones Médicas, en Kansas City (Misuri), dirigidos por los biólogos evolutivos Jaya Krishnan y Nicolas Rohner, descubrieron esa adaptación cuando cartografiaban los cambios de regulación génica que ayudan al pez a sobrevivir en ese entorno inhóspito. El análisis de las regiones reguladoras del ADN (que no producen las proteínas pero regulan el lugar

y el momento en que otros genes las fabrican) plantea grandes dificultades, por lo que usaron dos técnicas para comparar esos segmentos con los de otro pez de río emparentado. En primer lugar, cartografiaron los cambios en los marcadores químicos del ADN, que determinan los genes que se expresan. Después, registraron las mutaciones en las regiones reguladoras, que reconocieron mirando qué segmentos de la secuencia genética permanecían abiertos físicamente en el momento de la transcripción y cuáles quedaban plegados y cerrados.

«Esto representa un gran avance técnico que permitirá nuevos estudios sobre ellos [los peces cavernícolas]», asegura Suzanne McGaugh, investigadora de la ictiofauna cavernícola en la Universidad de Minnesota, que no ha participado en el nuevo estudio, publicado recientemente en *Nature Genetics*.

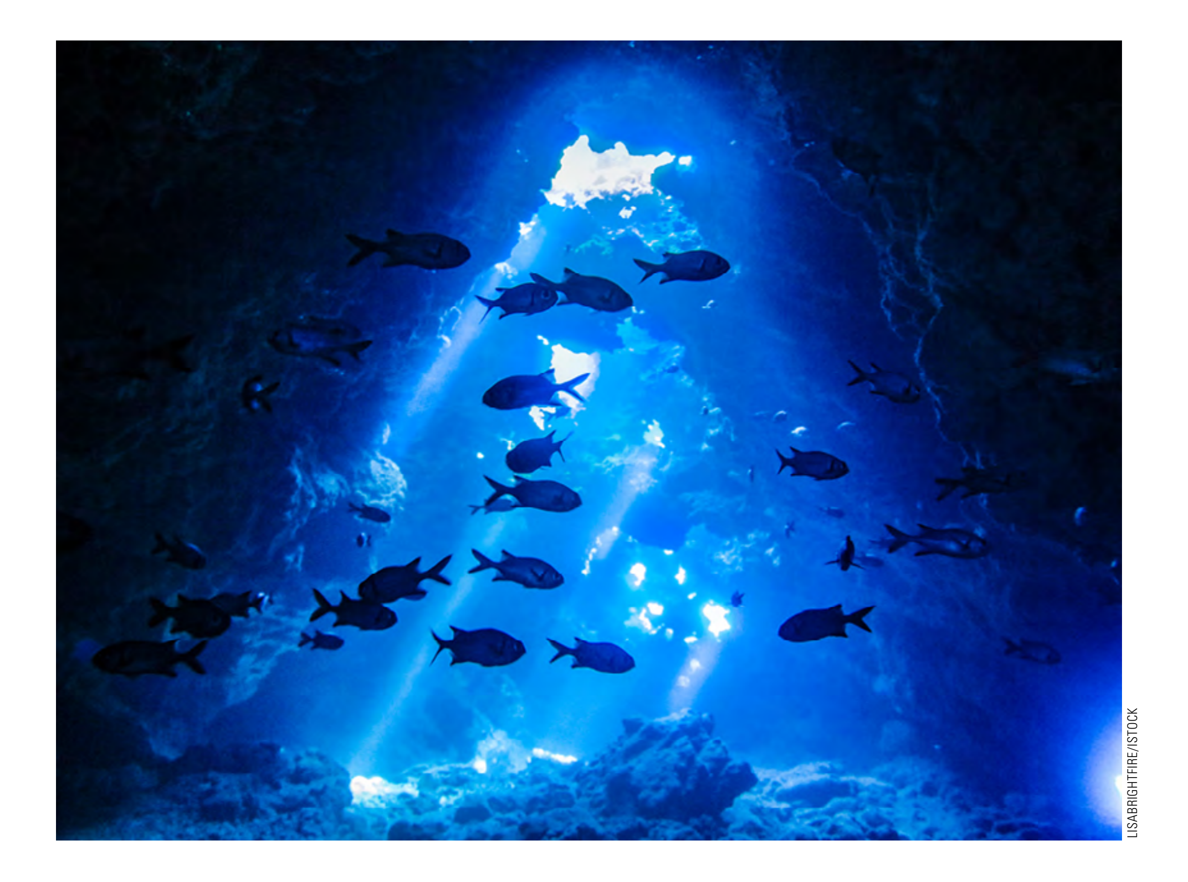
El equipo del estudio halló numerosas diferencias en el genoma del pez cavernícola en comparación con el de sus parientes de la superficie, entre ellas la desaparición de un fragmento del gen *hpdb*. Esa mutación impide que el pez metabolice la tirosina, el aminoácido precursor del pigmento melanina, cosa que explica su decoloración.

Llegaron a la conclusión de que la tirosina «es desviada hacia la generación de energía cuando se encuentra depauperado. A. mexicanus emplea cualquier sustrato a su disposición para fabricar energía y sobrevivir a las duras condiciones», explica Krishnan.

La tirosina también se destina a la producción de dopamina y noradrenalina, que numerosos animales segregan como respuesta al estrés. Estudios precedentes de peces cavernícolas habían vinculado la pérdida de pigmentación con las concentraciones elevadas de esas hormonas y con la escasa duración del sueño de estos animales. El presente artículo señala que la despigmentación influiría también en el metabolismo, según McGaugh.

Dado que los rasgos como la coloración, el metabolismo y el sueño dependen de hormonas y de reacciones químicas relacionadas, la adaptación en una de ellas alterará las demás. Krishnan opina que esas contrapartidas probablemente sean la norma, y no la excepción, en la fauna propia de los ambientes oligotróficos, donde escasean los nutrientes.

Viviane Callier



LISABRIGHTFIRE/ISTOCK

MEDICINA

EL CÁNCER DE PIEL EN EL MUNDO

Es un tumor frecuente que afecta mucho más a unas poblaciones y regiones que a otras

El cáncer cutáneo, el de mayor incidencia de todos, no deja de crecer debido al envejecimiento de la población en numerosos lugares. Su causa principal es la exposición a los rayos ultravioleta del sol, pero el riesgo varía de unas regiones del planeta a otras debido a las diferencias en la pigmentación de la piel (que protege frente al cáncer cutáneo) y en la cantidad de luz solar directa que reciben. «El melanoma cutáneo es casi 30 veces más frecuente en los blancos que en los negros», señala Ahmedin Jemal, oncoepidemiólogo de la Sociedad Estadounidense de Cáncer. «Y dentro de las poblaciones blancas, la vulnerabilidad también varía: aquellas con piel más clara, ojos azules y cabello rubio son más propensas.»

Pero también hay motivos para el optimismo. Los nuevos tratamientos para el cáncer de piel, como la inmunoterapia, han contribuido a aumentar la supervivencia, que ahora se sitúa alrededor del 93 por ciento a los cinco años en las personas diagnosticadas de melanoma con respecto a la población general.

Clara Moskowitz

Melanoma cutáneo: mortalidad e incidencia por país en 2020 (estandarizadas según la edad)

Mortalidad (por 100.000 personas)
0
1
2
3
4
5
Incidencia (por 100.000 personas)
0
5
10
15
20
25
30
35

África
Asia
Europa
América Latina y el Caribe
Norteamérica
Oceanía

Montenegro
Eslovaquia
Serbia
Croacia
Polonia
Namibia
Samoa
Uruguay
Israel
Canadá
España
Polinesia Francesa
Martinica
Francia, Nueva Caledonia
Austria
Irlanda
EE.UU.
Eslovenia
Suecia
Alemania
Noruega
Países Bajos
Dinamarca
Australia
Nueva Zelanda

Una de las razones por las que los namibios son más propensos al cáncer de piel que los residentes de otras naciones africanas es que ese país tiene la tasa más alta de albinismo per cápita del mundo. El trastorno, que provoca una falta de pigmentación de la piel, el cabello y los ojos, se asocia a un mayor riesgo de cáncer cutáneo.

La radiación UV es un 40 por ciento más intensa en Nueva Zelanda que en las latitudes correspondientes del hemisferio norte. Debido a la inclinación de la Tierra, el hemisferio sur está más cerca del sol durante su verano que el norte durante el suyo.

Las altas tasas de melanoma cutáneo de los países escandinavos obedecen a la piel clara de sus poblaciones, así como a la afición de estas a visitar los países mediterráneos.

¿Dónde y cuándo se producen las quemaduras solares?

Un estudio publicado en mayo de 2021 en el *American Journal of Preventive Medicine* analizó una encuesta de más de 4000 adultos estadounidenses para averiguar qué hacía la gente cuando se quemaba con el sol y en qué parte del cuerpo aparecían las lesiones. Si bien las quemaduras solares son un factor de riesgo primordial del cáncer de piel, la exposición que no llega a producir una quemadura también puede ser perjudicial, advierte Jemal. «Es importante no pensar que todo va bien mientras no te quemes con el sol.»



FUENTES: GLOBOCAN 2020, OBSERVATORIO GLOBAL DEL CÁNCER, AGENCIA INTERNACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DEL CÁNCER, 2022 (*incidencia y mortalidad*); «THE CONTEXT OF SUNBURN AMONG U.S. ADULTS COMMON ACTIVITIES AND SUN PROTECTION BEHAVIORS», DAWN M. HOLMAN ET AL. EN *AMERICAN JOURNAL OF PREVENTIVE MEDICINE*, VOL. 60, MAYO DE 2021 (*resultados de la encuesta*); MSJONESNYC (*gráficos*)

LA IMAGEN DEL MES

CRISTALES DE AMINOÁCIDOS

Una imagen fabulosa de estas moléculas obtenida con métodos caseros

En lugar de viajar, el fotógrafo Justin Zoll observa un mundo oculto de sicodélicas vistas cristalinas a través de un microscopio de segunda mano. Hace unos seis años, un amigo le inició en el mundo de la micrografía. Enseguida quedó cautivado por el proceso de combinar disolventes con sales cristalinas para generar composiciones atractivas.

Los colores vibrantes que se aprecian en sus fotografías son el producto en exclusiva de la estructura cristalina; no han sido retocados por ordenador. Eso sí, ha de tomar varias fotografías de cada preparación para crear un efecto panorámico.

El cuerpo fabrica los aminoácidos L-glutamato y beta-alanina, que aquí aparecen combinados formando este cuadro, pero también están a la venta como suplementos nutricionales destinados a atletas y culturistas. Para crear ese tipo de imagen, Zoll disuelve los compuestos (normalmente en vodka de alta graduación) y seca la mezcla, a veces con ayuda de calor. Comenta que los tonos dorados y turquesa de la imagen no suelen ser habituales en los cristales de aminoácidos.

Zoll no tiene formación en química ni física, pero le maravilla la belleza que la ciencia es capaz de mostrar.

Joanna Thompson



JUSTIN ZOLL



EL MAMÍFERO PLACENTARIO arcaico *Ectoconus* daba a luz a crías bien desarrolladas.

BETH ZAIKEN

PALEONTOLOGÍA

EL TRIUNFO DE LOS MAMÍFEROS

Steve Brusatte | Vivieron escondidos a la sombra de los dinosaurios durante millones de años hasta que un asteroide destructor originó un nuevo mundo en el que pudieron prosperar

Cada primavera, llevo a mis estudiantes al desierto del noroeste de México, al norte del cañón del Chaco, donde hace un milenio los indios pueblo ancestrales construyeron una gran ciudad excavada en las rocas. Mientras caminamos por las tierras resecas y de colores pastel, no podemos evitar pisar huesos de dinosaurio. El suelo está lleno de fragmentos de extremidades de *Tyrannosaurus rex* y trozos de vértebras que sostenían los largos cuellos de los saurópodos hace unos 66,9 millones de años, durante el período Cretácico. Y entonces, de repente, ya no encontramos más.

Mientras continuamos ascendiendo, pasando de una capa de roca a otra, nos percatamos de la presencia de un nuevo tipo de fósil: mandíbulas llenas de dientes. Pero estos no eran afilados como los de *T. rex*, sino que tenían cúspides y valles. Eran molares de mamíferos. En el viaje que realicé a ese mismo lugar en 2014, seguí su rastro hasta el lecho de un arroyo seco sagrado para los navajos llamado Kimbeto, el «manantial del gavilán». Oí un grito de victoria que procedía del otro extremo del cauce seco. Mi compañero Tom Williamson había hallado un esqueleto perteneciente a un gran animal que debía pesar unos 100 kilogramos. A partir de su pelvis dedujimos que dio a luz a una cría viva y bien desarrollada. Se trataba de un mamífero placentario como nosotros.

Este mamífero fósil, denominado *Ectoconus*, fue un descubrimiento revolucionario. Vivió tan solo unos 380.000 años después del peor día de la historia del planeta, cuando un asteroide de casi diez kilómetros de ancho acabó de forma violenta con la era de los dinosaurios, dando paso a un nuevo mundo. Los libros de texto suelen contar esta historia de una forma bastante sencilla: los dinosaurios murieron, pero los mamíferos sobrevivieron y en muy poco tiempo ocuparon su lugar dominante. Sin embargo, esta historia ha pasado por alto una realidad inquietante: sabemos muy poco sobre los mamíferos que sobrevivieron a la extinción y perseveraron durante los siguientes 10 millones de años, en la época conocida como Paleoceno. ¿Cómo lograron perdurar, cuando el 75 por ciento de las especies murieron, y cómo establecieron los cimientos de los que surgieron las más de seis mil especies de mamíferos placentarios que existen hoy, desde los murciélagos voladores hasta las ballenas acuáticas y los humanos?

EN SÍNTESIS

Desde que, a finales del siglo XIX, se descubrieron los primeros fósiles de mamíferos placentarios, se ha debatido sobre cómo lograron sobrevivir al choque del asteroide que terminó con la mayoría de las especies.

Gracias a nuevos descubrimientos y al empleo de técnicas científicas avanzadas, en los dos últimos decenios se ha descrito la identidad de los placentarios más primitivos.

Estos desarrollaron rasgos y comportamientos que les ayudaron a adaptarse al caos inicial y a ocupar los nichos vacantes tras el impacto. Fueron prosperando hasta dar paso a la era de los mamíferos.

Los científicos llevan debatiendo sobre estas cuestiones desde la década de 1870, cuando aparecieron en Nuevo México los primeros fósiles de mamíferos placentarios del Paleoceno. Finalmente, durante las dos últimas décadas, y gracias a nuevos descubrimientos y a las técnicas científicas más novedosas, se ha podido averiguar quiénes fueron estos pioneros placentarios. Poco faltó para que siguieran el mismo destino de los dinosaurios, pero después de sobrevivir a duras penas a las emisiones de azufre, su tamaño corporal fue aumentando (desde el de una rata al de una vaca), diversificaron la dieta y el comportamiento, y, con el tiempo, su cerebro creció en volumen, lo que dio paso a la nueva era de los mamíferos.

Orígenes triásicos

Retrocedamos hasta el período Triásico. Tendemos a suponer con demasiada frecuencia que los mamíferos sucedieron a los dinosaurios. Pero, de hecho, ambos grupos se originaron más o menos en la misma época y en el mismo lugar: hace unos 225 millones de años, cuando todas las tierras emergidas estaban agrupadas en el supercontinente Pangea. En esa época, nuestro planeta se estaba recuperando de la peor extinción en masa de su historia. Durante millones de años, los megavolcanes de Siberia habían escupido lava y dióxido de carbono durante millones de años y habían provocado un pico de calor global que había matado hasta el 95 por ciento de todas las especies. Cuando los volcanes se apagaron, surgieron dinosaurios, mamíferos y muchos otros grupos que llenaron el vacío.

Durante los siguientes 160 millones de años, los dinosaurios y los mamíferos siguieron cami-



LAS ROCAS DEL ARROYO SECO DE TORREÓN, en el noroeste de Nuevo México, contienen fósiles de mamíferos que vivieron en el Paleoceno.

nos separados, pero ambos tuvieron éxito. Los dinosaurios alcanzaron tamaños descomunales y excluyeron a los mamíferos de los nichos destinados a animales de esas dimensiones. Los mamíferos hicieron justo lo contrario: con sus pequeños cuerpos podían explotar nichos ecológicos que eran inaccesibles para los dinosaurios. Alcanzaron una ventaja competitiva en esos hábitats, lo que evitó que *T. rex*, *Triceratops* y sus parientes dieran lugar a especies pequeñas. Hace entre 201 millones y 66 millones de años, durante los períodos Jurásico y Cretácico, una gran cantidad de pequeños mamíferos (ninguno más grande que un tejón) vivían a la sombra de los dinosaurios. Había animales escurridizos, trepadores, excavadores, nadadores y planeadores. En estas especies surgieron los rasgos que caracterizan a los mamíferos: pelo, metabolismo de sangre caliente, una compleja gama de dientes (caninos, incisivos, premolares y molares) y la capacidad de alimentar a las crías con leche.

Estos primeros mamíferos acabaron componiendo un frondoso árbol genealógico. Había docenas de subfamilias que se distinguían por sus diferentes tipos de dientes, dietas y estilos reproductivos. Uno de esos grupos, los multituberculados, prosperó en las sombras del Cretácico. Utilizaban los premolares en forma de hojas de sierra y los punzantes incisivos para devorar un nuevo tipo de alimento: frutas y flores. Durante las expediciones polaco-mongolas que se internaron en el desierto de Gobi entre 1963 y 1971 —uno de los primeros trabajos de campo paleontológicos dirigidos por mujeres y capitaneado por una de mis heroínas, la difunta paleobióloga polaca Zofia Kielan-Jaworowska—, se descubrieron decenas de fósiles de esos animales.

Mientras tanto, a medida que los multituberculados prosperaban, otros tres grupos se separaron del tronco principal y dieron lugar a los tres linajes de mamíferos que persisten en la actualidad: los monotremas ovíparos; los

marsupiales, que dan a luz crías débiles que se desarrollan en una bolsa; y los placentarios, como *Ectoconus* y nosotros, que damos a luz a crías más grandes. El reloj molecular (técnica que permite datar cuándo divergieron dos especies basándose en las diferencias existentes en su ADN) predice que algunos linajes placentarios, entre ellos los primates, coexistieron con los dinosaurios. Aunque los paleobiólogos intentan encontrar fósiles de esos primeros placentarios, hasta el momento no lo han conseguido.

Entonces, hace unos 66 millones de años, esta imagen primigenia, compuesta por dinosaurios que gobernaban el planeta y mamíferos que correteaban en las sombras, acabó de forma catastrófica. Un asteroide del tamaño del monte Everest atravesó los cielos, más veloz que un avión de pasajeros, e impactó finalmente en la actual península de Yucatán, en México, golpeando la Tierra con la fuerza de más de mil millones de bombas atómicas y creando un agujero en la corteza terrestre de más de 16 kilómetros de profundidad y más de 160 kilómetros de ancho. En todo el planeta se produjeron tsunamis, incendios forestales, terremotos y erupciones volcánicas. El polvo y el hollín se esparcieron por toda la atmósfera oscureciendo el mundo durante años. Las plantas no podían realizar la fotosíntesis, los bosques y los herbívoros murieron y, tras ellos, los carnívoros siguieron el mismo destino. Los ecosistemas se desmoronaron. Fue el fin de la era de los dinosaurios.

Por los pelos

El asteroide fue apocalíptico y modificó el curso de la historia de la Tierra. Incapaces de hacer frente a las consecuencias del impacto, tres de cada cuatro especies sucumbieron a la extinción. Los dinosaurios fueron las víctimas más famosas: murieron todos los de cuello largo, los que tenían cuernos, pico de pato, cabeza en forma de cúpula y dientes afilados, y quedó un puñado de aves que han conservado el legado de los dinosaurios hasta nuestros días.

¿Y qué ocurrió con los mamíferos? En la mayoría de los relatos sobre la extinción de finales del Cretácico, son retratados como los grandes supervivientes, los ganadores que arrebataron la corona a los dinosaurios. Está claro que en cierto sentido es cierto. Si no hubieran sobrevivido, nosotros no estaríamos aquí. Pero las recientes investigaciones han puesto de manifiesto que se salvaron por los pelos y que su destino dependió de lo que ocurrió en los días, décadas y milenios posteriores al impacto del asteroide. Para los mamíferos, la colisión fue el momento en el que más peligró su existencia, pero, al mismo tiempo, supuso su gran oportunidad para prosperar.

Los mejores fósiles de mamíferos que soportaron el impacto del asteroide se han hallado en las Grandes Llanuras septentrionales de Estados Unidos. Durante casi medio siglo, William Clemens, de la Universidad de California en Berkeley, fallecido en 2020, exploró las tierras de los ranchos del noreste de Montana. Estas colinas están formadas por rocas erosionadas por ríos que recorrían las ancestrales Montañas Rocosas. Fluyeron a través de los bosques durante tres millones de años, un espacio de tiempo que abarca el final del Cretácico, la caída del asteroide y los albores del Paleoceno. Gregory Wilson Mantilla, antiguo estudiante de Clemens y actual paleontólogo de la Universidad de Washington, ha estudiado y analizado estadísticamente decenas de miles de fósiles hallados en estas capas para averiguar cómo vivieron y por qué murieron esos animales.

Las recientes investigaciones indican que los mamíferos se salvaron por los pelos de la extinción

Es posible que les sorprenda, pero a los mamíferos les iba bastante bien al final del Cretácico. En Montana vivían al menos 30 especies. Situados en la base de la cadena trófica dominada por los dinosaurios, desempeñaban distintas funciones ecológicas. Había trituradores de huesos, consumidores de flores, insectívoros y omnívoros. Casi todos eran metaterios (los primeros miembros de la línea marsupial) o multituberculados. Ya había euterios, los primos tempranos de los placentarios, aunque eran muy escasos. Esta situación se mantuvo estable durante los últimos dos millones de años del Cretácico. No había señales de que existieran problemas importantes.

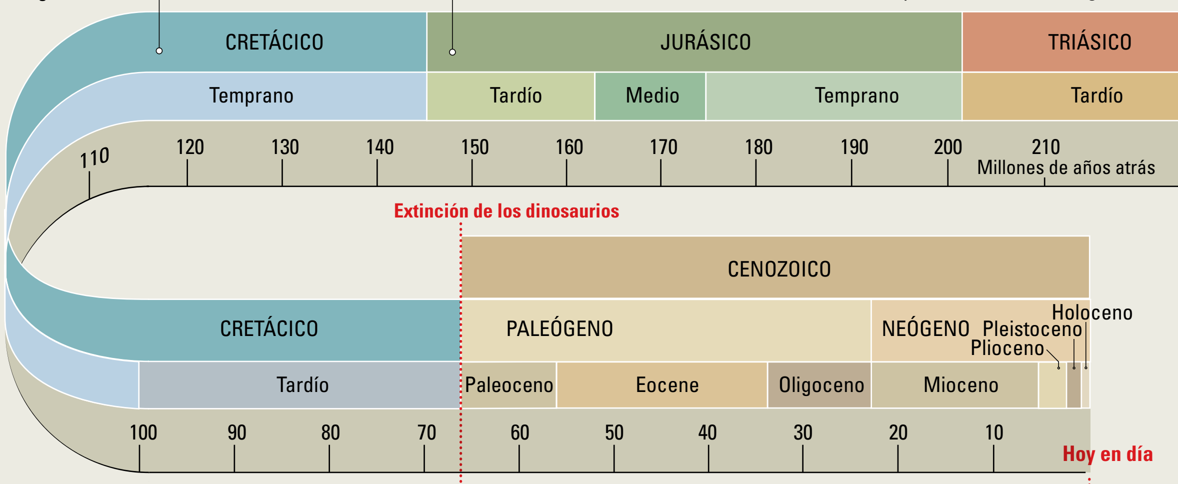
El auge de los mamíferos

Los mamíferos vivieron a la sombra de los dinosaurios durante decenas de millones de años. Empezaron a prosperar después de que, hace 66 millones de años, una roca espacial de casi diez kilómetros de ancho cayera en lo que actualmente es el golfo de México y matara al 75 por ciento de las especies (incluidos los dinosaurios no aviares). Hallazgos recientes revelan cómo los mamíferos lograron sobrevivir a la extinción en masa y cómo prosperaron y dieron lugar a la gran variedad de especies que hoy habitan en el mar, la tierra y el cielo.

Aparecen los antepasados de los monotremas ovíparos, los marsupiales con bolsa y los placentarios que dan a luz a grandes crías.

Los mamíferos desarrollan toda una serie de tipos corporales para explotar los diversos nichos ecológicos vacantes, pero, a diferencia de los dinosaurios, mantienen un tamaño reducido.

Tanto los mamíferos como los dinosaurios se originan hace unos 225 millones de años en el supercontinente de Pangea.



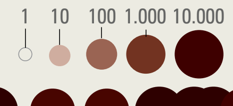
TAMAÑO CORPORAL

Tener un cuerpo pequeño ayudó a algunos mamíferos a sobrevivir al impacto del asteroide que provocó la extinción de los dinosaurios. Pero después de eso, el tamaño corporal de los precursores de los placentarios empezó a aumentar. Pasó de ser tan pequeño como el de las ratas hasta ser el de una vaca o más grande todavía.



DIVERSIDAD ECOLÓGICA

En los placentarios aparecieron rasgos que les permitieron explorar el variado conjunto de nichos ecológicos que estaban vacantes. Por ejemplo, algunos tenían cuerpos y dientes especializados para trepar a los árboles y comer fruta; otros se especializaron para excavar bajo tierra y masticar tubérculos.



ABUNDANCIA DE ESPECIES

Cuando el período Cretácico dio paso al Paleoceno y los ecosistemas se recuperaron de la devastación provocada por el asteroide, el número de especies de mamíferos en las comunidades locales creció enormemente.

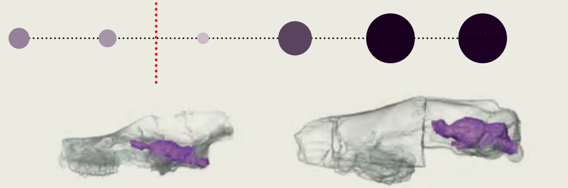


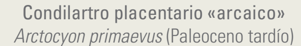
TAMAÑO DEL CEREBRO/ INTELIGENCIA

De todos los animales vertebrados, los mamíferos son los que tienen cerebros más grandes en proporción con su tamaño corporal. Antes se pensaba que sus cerebros crecieron de forma progresiva. Pero hallazgos recientes muestran que estos no fueron especialmente voluminosos hasta después de contar con cuerpos grandes.



Las tomografías computarizadas de cráneos fósiles revelan que el tamaño del cerebro se redujo en los primeros placentarios y luego aumentó de forma independiente en varios linajes gracias al crecimiento pronunciado de las regiones cerebrales relacionadas con la función sensorial.





Condilartro placentario «arcaico»
Arctocyon primaevus (Paleoceno tardío)



Tilodonte placentario «arcaico»
Trogosus hillsis (Eoceno medio)



Perisodáctilo placentario moderno
Hyrachyus modestus (Eoceno medio)

«THE EVOLUTION OF MAXIMUM BODY SIZE OF TERRESTRIAL MAMMALS», F. A. SMITH ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 330, NOVIEMBRE DE 2010 (*datos de tamaño corporal*); «UNTANGLING THE MULTIPLE ECOLOGICAL RADIATIONS OF EARLY MAMMALS», D. M. GROSSNICKLE ET AL. EN *TRENDS IN ECOLOGY AND EVOLUTION*, VOL. 34, OCTUBRE DE 2019 (*datos de diversidad ecológica*); «DIVERSITY DYNAMICS OF PHANEROZOIC TERRESTRIAL TETRAPODS AT THE LOCAL-COMMUNITY SCALE», R. A. CLOSE ET AL. EN *NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION*, VOL. 3, FEBRERO DE 2019 (*datos de diversidad de especies*); «BRAWN BEFORE BRAINS IN PLACENTAL MAMMALS AFTER THE END-CRETACEOUS EXTINCTION»; O. C. BERTRAND ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 376, PÁGS. 80-85, 31 DE MARZO DE 2022 (*datos de tamaño cerebral*); JEN CHRISTIANSEN Y ORNELLA BERTRAND (*gráficos y cerebros*)

Y, de repente, todo cambió. Si nos fijamos en las rocas sedimentarias que se formaron hace unos 66 millones de años, veremos que aparece una línea delgada. Está saturada con iridio, un elemento muy difícil de encontrar en la superficie de la Tierra pero bastante común en el espacio exterior. Es la huella química del asteroide. Los dinosaurios, entre ellos *T. rex* y *Triceratops*, desaparecieron de forma abrupta. El Cretácico dio paso al Paleoceno.

El escenario del Paleoceno temprano es funesto. Hay una zona de fósiles en Montana, conocida como línea Z, que data de unos 25.000 años después del impacto del asteroide. Apesta a muerte. Casi todos los mamíferos que prosperaron en la región durante el Cretácico desaparecieron; solo sobrevivieron siete especies. En otros yacimientos fósiles se han encontrado más pruebas de lo que ocurrió entre 100.000 y 200.000 años después. En esa época solo vivieron, en total, 23 especies de mamíferos. Solo una de ellas era un metaterio; estos antepasados marsupiales que fueron tan abundantes durante el Cretácico casi se extinguieron. Dicho esto, si tenemos en cuenta todo el registro fósil de Montana y los datos obtenidos en todo el oeste de Norteamérica, las estadísticas son desalentadoras. Solo sobrevivió a la carnicería un mísero 7 por ciento de todos los mamíferos existentes hasta entonces. Imaginen un juego de la ruleta rusa de los asteroides: una pistola con 10 cámaras, nueve de las cuales contienen una bala. Incluso esas probabilidades serían mejores que las que tuvieron nuestros ancestros en el nuevo mundo del Paleoceno.

Esta situación tan poco esperanzadora hace que nos planteemos una pregunta: ¿por qué sobrevivieron algunos mamíferos y otros no? la respuesta quedó clara cuando Wilson Mantilla estudió tanto a las víctimas como a los supervivientes. Estos últimos eran de menor tamaño que la mayoría de mamíferos cretácicos, y sus dientes indican que tenían una dieta generalista y omnívora. En cambio, las víctimas eran más grandes y tenían una dieta más especializada, ya que eran o carnívoros o herbívoros. Estaban perfectamente adaptados al mundo del final del Cretácico, pero, cuando el asteroide provocó la catástrofe, sus adaptaciones dejaron de ser útiles. Por otro lado, los generalistas de menor tamaño eran capaces de comer cualquier cosa que encontraran en medio del caos que se desató después del impacto, y podrían haberse escondido más fácilmente para esperar a que pasara lo peor.

A medida que los ecosistemas se fueron recuperando durante la primera etapa del Paleoceno, la mayoría de los mamíferos que empezaron a multiplicarse eran euterios, los antepasados placentarios que en su día desempeñaron un papel secundario durante el Cretácico. Su cuerpo pequeño, su dieta flexible, y tal vez su mayor rapidez a la hora de crecer y reproducirse, les permitieron apoderarse de nichos vacantes y empezar a construir nuevas redes tróficas. Unos 100.000 años después del impacto del asteroide apareció un nuevo euterio en Montana y en muy poco tiempo se volvió muy común. *Purgatorius*, que comía frutas gracias a sus molares con suaves cúspides y cuyos tobillos dotados de gran movilidad le permitían agarrarse y trepar por los árboles, fue uno de los primeros miembros de la línea que dio lugar a los primates. Él, o puede que otro euterio emparentado con él, fue nuestro antepasado.

Los primeros placentarios

Estos intrépidos supervivientes forjaron un nuevo mundo, la era de los mamíferos, en la que los placentarios prosperaron más que todos los demás. Algunos de los mejores fósiles de los primeros placentarios auténticos que formaron diversas comunidades en el Paleoceno provienen de Nuevo México, en particular de Kimbeto. *Ectoconus*, cuyo esqueleto excavamos en 2014, fue uno de esos pioneros. Cuando saltaba a través de los bosques húmedos y comía hojas y granos hace 65,6 millones de años, era el mamífero más grande que jamás había vivido en ese lugar. Era una de las docenas de nuevas especies de placentarios de ese entorno, mientras que los dinosaurios empezaban a pasar a formar parte del pasado.

Hace casi 150 años que sabemos que los placentarios ya estaban presentes en el Paleoceno. Sus fósiles aparecen en los estudios realizados durante las décadas de 1870 y 1880, cuando los geólogos se unieron a los cartógrafos y a los soldados para parcelar tierras recién arrebatadas a los nativos americanos. Uno de esos exploradores, David Baldwin, encontró un gran número de mamíferos en Kimbeto y en otros sitios de una antigüedad parecida. Aparecían intercalados entre fósiles más antiguos de dinosaurios del Cretácico y de mamífe-

ros más recientes del Eoceno (hace entre 56 y 34 millones de años) que podrían clasificarse en grupos que nos resultan tan familiares como los de los caballos, los monos y los roedores. Sin embargo, los mamíferos del Paleoceno descubiertos por Baldwin no se podían catalogar tan fácilmente. Eran mucho más grandes que cualquier mamífero del Cretácico, y carecían de huesos epipúbicos en la parte delantera de la pelvis, lo que sugiere que tenían grandes placentas para alimentar a sus crías en el útero. Está claro, pues, que eran auténticos placentarios. Pero su esqueleto era algo peculiar, muy fornido, con mezclas de rasgos vistos en varios grupos de mamíferos modernos.

Estos «bichos raros» del Paleoceno resultaron ser bastante problemáticos para los especialistas, que empezaron a descartarlos como placentarios «arcaicos». ¿Qué relación tenían con sus antepasados del Cretácico y con los mamíferos modernos? ¿Cómo se movían, comían y crecían? Estas cuestiones desconcertaron a los paleontólogos durante generaciones. Uno de ellos era Thomas Williamson, conservador del Museo de Historia Natural y Ciencia de Nuevo México. Durante más de un cuarto de siglo, exploró las tierras baldías, entrenando a sus hijos gemelos, Ryan y Taylor, y a muchos estudiantes navajos locales para que se convirtieran en ases de la recolección de fósiles. Durante la última década, junto con mis estudiantes nos hemos unido al equipo de Tom.

Tom y su equipo han recolectado miles de fósiles, gracias a los cuales nos podemos hacer una idea bastante clara de cómo era la vida en el Paleoceno durante el primer millón de años posterior al impacto del asteroide. Entre el grupo de placentarios arcaicos hay animales, como *Ectoconus*, que se han metido con calzador en un orden algo nebuloso: los condilartros. Este orden estaba compuesto principalmente por herbívoros y omnívoros de complexión robusta, dotados a menudo de pezuñas. Compartían los nichos de los herbívoros con los pantodontos, de pechos robustos y pies y manos enormes y que podían alcanzar el tamaño de una vaca actual. Otro grupo, los taeniodontos, con un aspecto parecido a las gárgolas, eran excavadores: utilizaban sus enormes antebrazos con garras para escarbar la tierra y sus grandes mandíbulas y caninos de corona alta para arrancar tubérculos. Todos estos mamíferos habrían temido a los trisodóntidos, el terror del Paleoceno, parecidos a lobos supermusculados que destrozaban los huesos de las presas con unos temibles molares.

Desentrañar las relaciones genealógicas de estos placentarios arcaicos es todo un reto. Mi grupo de investigación está trabajando actualmente con Williamson, con John Wible, especialista en mamíferos del Museo Carnegie de Historia Natural, y con otros expertos para resolver este misterio de la filogenia. Estamos recopilando un gran conjunto de datos anatómicos y genéticos de los mamíferos fósiles y actuales para así poder construir un árbol genealógico general. Nuestros resultados preliminares son alentadores. Algunas de las especies arcaicas, como los taeniodontos, podrían proceder de ancestros euterios del Cretácico, por lo que estarían entre los placentarios más primitivos del árbol genealógico. Otros, entre ellos algunos condilartros, comparten características con los mamíferos ungulados actuales y es muy probable que fueran los antepasados de los caballos y las reses. Por lo tanto, parece ser que los placentarios arcaicos componían un conjunto muy diverso; algunos de ellos formaron sus propios subgrupos idiosincráticos, y otros, el conjunto ancestral a partir del cual surgieron los placentarios actuales.

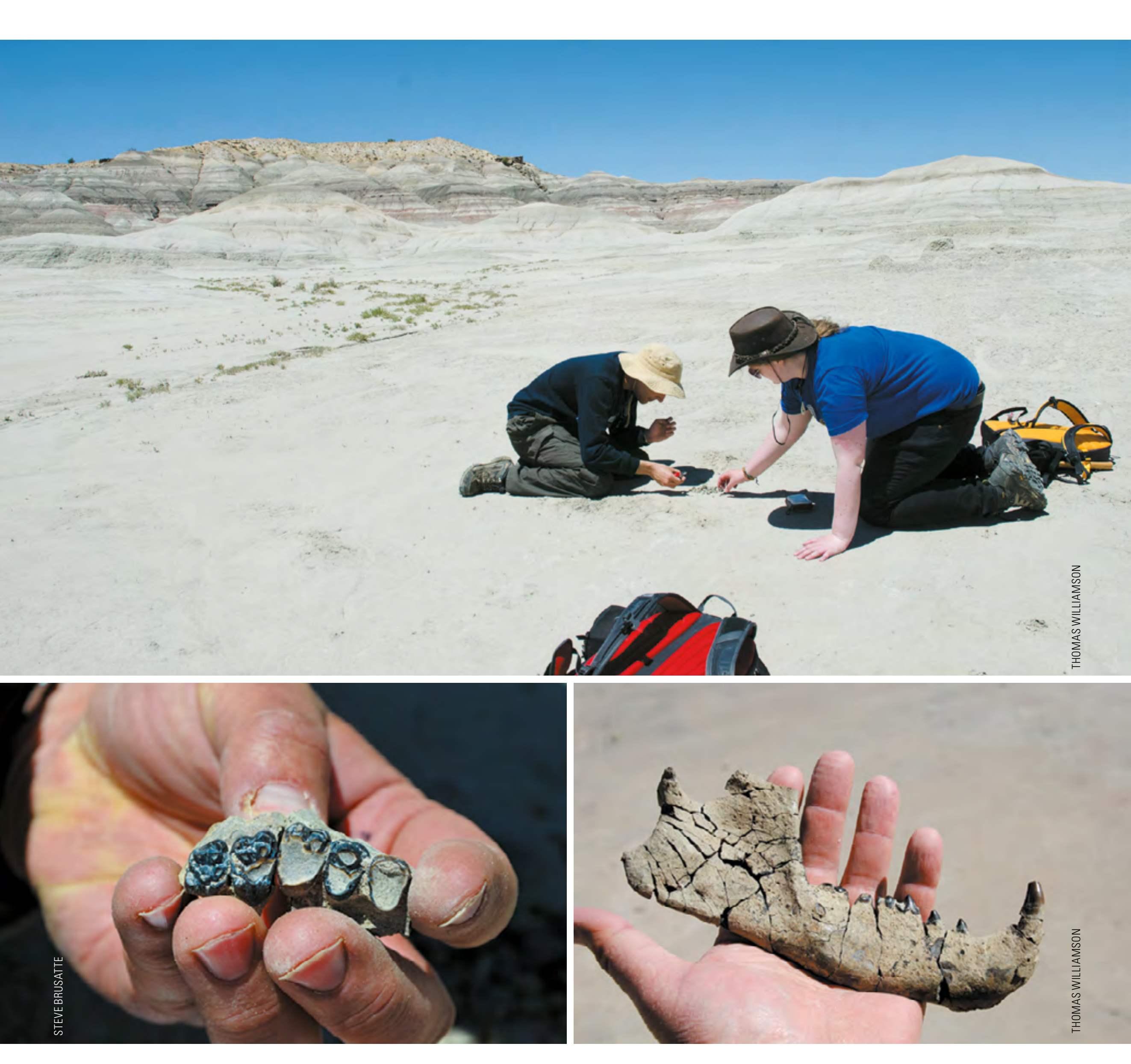
Una ventaja inicial

Aunque de momento desconocemos cuál sería el lugar concreto que ocuparían los condilartros, los taeniodontos y sus congéneres arcaicos en el árbol genealógico, sí que estamos empezando a averiguar cómo era su vida. Los fósiles que nuestro equipo ha recogido y estudiado mediante las técnicas más modernas revelan cómo estos placentarios desarrollaron novedosas características y comportamientos que les ayudaron a adaptarse al caos inicial del Paleoceno y a adquirir una ventaja que les permitiría ocupar los nichos vacantes. Numerosas características distintivas de los placentarios aparecieron en esta época y ayudaron a que los supervivientes de la extinción evolucionaran hasta convertirse en nuevos y diferentes especialistas. Estos rasgos, que apuntalaron el éxito de los placentarios durante los siguientes 66 millones de años, sustentan hoy la biología de nuestra propia especie.

Una de las principales características de los mamíferos placentarios es la capacidad de dar a luz a crías bien desarrolladas que se gestan durante un prolongado espacio de tiempo dentro del cuerpo de las madres antes de nacer en

un estado ya avanzado. Es del todo diferente al modo en el que se reproducen los otros dos tipos de mamíferos existentes. Las crías de los monotremas nacen de huevos, y los marsupiales nacen tan prematuramente que deben refugiarse en la bolsa de su madre durante meses para completar el desarrollo. La gestación prolongada permite a algunos placentarios tener una ventaja inicial: en muchas especies, las crías ya pueden moverse al nacer, socializar e incluso conseguir alimento poco después.

Para hacerse una idea de cómo crecían los placentarios arcaicos del paleoceno, Gregory Funston, becario posdoctoral de mi laboratorio en la Universidad de Edimburgo, cortó algunos dientes de esas especies, incluidos los dientes de leche de crías, en rodajas lo bastante finas para poderlas analizar bajo el microscopio. Al contar las líneas de crecimiento diarias e identificar en el esmalte moléculas características de estrés (causado por el nacimiento), constató que algunas de estas madres alimentaron a sus



EN EL ARROYO SECO DE KIMBETO, también en el noroeste de Nuevo México (*arriba*), los equipos de campo recuperaron fósiles de mandíbulas del herbívoro *Ectoconus* (*abajo, izquierda*) y de los temibles carnívoros conocidos como trisodóntidos (*abajo, derecha*).

crías en el vientre durante unos siete meses, más del doble de tiempo que los marsupiales. Esta observación confirma algo que ya sabíamos gracias a los datos de la anatomía pélvica: esas especies del Paleoceno eran placentarias. Y lo que es más importante, esta estrategia de desarrollo les proporcionó una gran ventaja. Las crías más grandes tendían a dar lugar a adultos de mayor tamaño. De este modo, después de haber permanecido 160 millones de años con un tamaño reducido, los primeros placentarios se hicieron más grandes en unos pocos cientos de miles de años tras la desaparición de los dinosaurios.

Al mismo tiempo que su tamaño iba aumentando, los placentarios del Paleoceno se diversificaron de distintas maneras. Mi exalumna y actual posdoctoranda Sarah Shelley, quien partició de forma importante en nuestro trabajo de campo en Nuevo México, estudió con detalle los esqueletos de las especies arcaicas y prestó especial atención a cómo estaban unidos los músculos. Realizó un análisis estadístico de un gran conjunto de medidas, comparando las de las especies del Paleoceno con sus precursoras cretácicas y con sus descendientes actuales. Lo que descubrió fue inesperado: los esqueletos de los placentarios arcaicos eran enormemente diversos y sus tobillos les permitían realizar varios tipos de locomoción. De hecho, a simple vista, los esqueletos eran fornidos y muy similares entre sí, una de las razones por las que durante mucho tiempo se los consideró arcaicos. Pero las estructuras musculares eran muy adaptables, lo que permitió a las diferentes especies excavar, trotar y trepar. Dichas especies también podían consumir diferentes tipos de alimentos. Esta gran diversificación es una característica de lo que los biólogos llaman radiación adaptativa, un fenómeno que se produce cuando, a partir de un mismo antepasado proliferan con rapidez muchas especies, las cuales modifican aspectos de su apariencia y comportamiento para poder aprovechar las características de los nuevos entornos.

Sin embargo, a pesar de todas estas especializaciones, los placentarios arcaicos del Paleoceno no eran particularmente inteligentes. Esta sorprendente revelación la proporcionó un estudio dirigido por Ornella Bertrand, posdoctoranda de mi laboratorio. Empleó la tomografía para reconstruir digitalmente el cerebro, los oídos y otras estructuras neurosensoriales de especies extinguidas. Escaneó diversos cráneos de placentarios arcaicos de Nuevo México, además de otros asombrosos fósiles nuevos que Tyler Lyso, Ian Miller y su equipo descubrieron cerca de Denver. En comparación con sus minúsculos predecesores cretácicos, los mamíferos del Paleoceno poseían cerebros más grandes en cuanto a tamaño absoluto. Sin embargo, tal como demuestran los estudios de laboratorio y de campo sobre mamíferos actuales, es el tamaño cerebral relativo (relación entre volumen cerebral y masa corporal) lo que importa de verdad. El tamaño cerebral relativo de los placentarios arcaicos era ridículamente pequeño en comparación no solo con el de los mamíferos actuales, sino incluso con el de las especies del Cretácico que convivieron con los dinosaurios.

El tamaño cerebral de los placentarios arcaicos era ridículamente pequeño, si se compara con el de los mamíferos actuales y el de otras especies que convivieron con los dinosaurios

Parece ser, pues, que los primeros placentarios se hicieron tan grandes y a tal velocidad que su cerebro no pudo seguir inicialmente ese ritmo. Este hallazgo contradice una antigua creencia según la cual el cerebro de los mamíferos se hizo poco a poco más grande con el tiempo, tanto en tamaño absoluto como relativo. Puede que también desafíe las expectativas: ¿los mamíferos que fundaron la dinastía de los placentarios no deberían de haber utilizado su ingenio para sortear los obstáculos a los que se enfrentaron tras la caída del asteroide? Parece ser que no. Era más importante que creciera el cuerpo que el cerebro, al menos al principio, cuando había tantos nichos vacantes que ocupar. En un mundo

tan variable y lleno de abundantes oportunidades, un cerebro voluminoso habría sido incluso perjudicial debido a su mayor coste energético.

Finalmente, a medida que los ecosistemas se estabilizaron y la competencia entre los nuevos placentarios aumentó, el cerebro empezó a crecer, sobre todo la neocorteza, una región fundamental del cerebro implicada en la cognición superior y en la integración sensorial. Pero esta expansión tendría que esperar hasta el siguiente intervalo de tiempo después del Paleoceno: el Eoceno, cuando los placentarios arcaicos fueron disminuyendo en número y los grupos placentarios modernos (incluidos caballos, murciélagos y ballenas) se apoderaron del planeta.

El mundo moderno

El mundo del Paleoceno era un enorme invernadero. Los mamíferos de Nuevo México retozaban en las junglas, y en las latitudes altas se podían encontrar cocodrilos tomando el sol. Entonces, hará unos 56 millones de años, el invernadero se calentó todavía más. El magma empezó a acumularse bajo los continentes del norte y migró hacia arriba con extrema facilidad. A medida que se fue filtrando a través de la corteza, «coció» las rocas de la Tierra profunda. Como un motor que quema gasolina, esta actividad liberó dióxido de carbono: billones de toneladas calentaron la atmosfera en entre cinco y ocho grados Celsius durante, como mucho, 200.000 años. Desde entonces, la Tierra nunca ha estado tan caliente.

Este repentino calentamiento, conocido como Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, fue otro obstáculo más que tuvieron que superar los mamíferos. Pero, en este caso, a diferencia de lo ocurrido 10 millones de años atrás, cuando cayó el asteroide, se extinguieron muy pocas especies de mamíferos. Para evitarlo, se trasladaron siguiendo los nuevos corredores migratorios que se abrieron cuando aumentaron las temperaturas y que les condujeron hacia latitudes más elevadas. Algunos de esos emigrantes desarrollaron nuevas adaptaciones, especialmente un cerebro más grande. También adquirieron nuevos rasgos: los primates se dotaron de uñas con las que podían agarrarse mejor a las ramas; los artiodáctilos (ungulados de dedos pares) desarrollaron tobillos en forma de polea que facilitaban la carrera rápida; y los perisodáctilos (ungulados de dedos impares) adquirieron grandes pezuñas que los convirtieron en campeones del galope. Estos mamíferos más modernos pululaban por los continentes de América del Norte, Europa y Asia, por entonces interconectados, y su migración masiva supuso el principio del fin de los placentarios arcaicos. Los condilartros, los taeniodontos, los pantodontos y los trisodóntidos solo sobrevivirían durante algo más de tiempo.

Al sur del ecuador, donde los fósiles de mamíferos del Cretácico y del Paleoceno son mucho más escasos, la historia fue muy diferente. África y Sudamérica eran continentes insulares en los que los placentarios evolucionaron de forma independiente del resto del mundo: los elefantes y sus parientes en África; los osos perezosos y los armadillos en Sudamérica. Más al sur lograron sobrevivir las otras dos líneas de mamíferos. Los monotremas, como el ornitorrinco y el equidna, se refugiaron en Australia y Nueva Guinea, donde solo quedan cinco especies en la actualidad. Los marsupiales fueron aniquilados en los continentes septentrionales, pero sobrevivieron al inmigrar a Sudamérica y luego saltaron a través de la Antártida hasta Australia, donde se diversificaron y dieron lugar a los canguros y los koalas. (Más adelante, uno de esos grupos regresó a América del Norte: las zarigüeyas.)

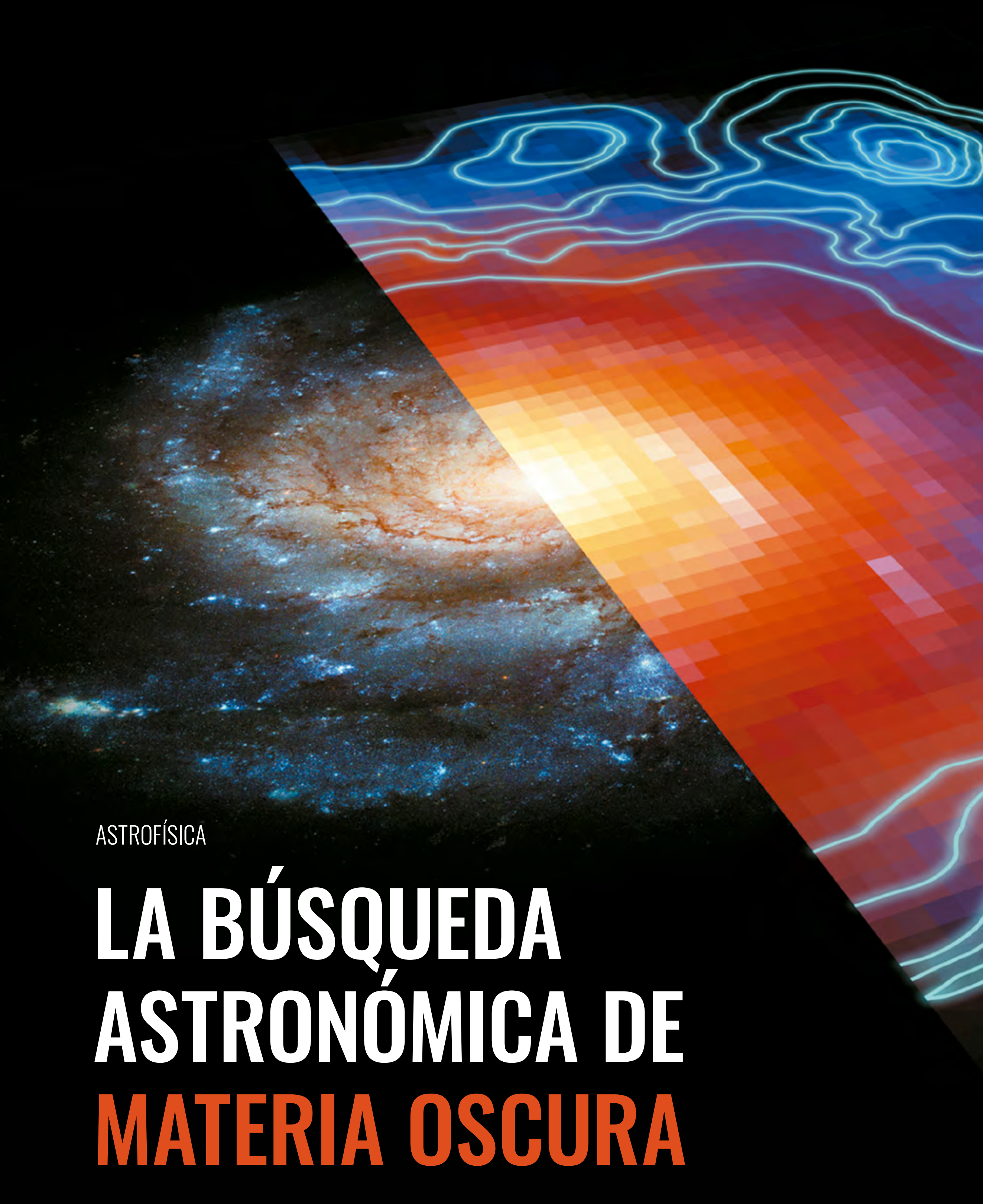
Pero el futuro pertenecía, sobre todo, a los placentarios. En poco tiempo, a medida que la Tierra se fue enfriando, algunos de sus miembros se columpiaban de los árboles, otros batían las alas y otros cambiaron los brazos por aletas y se convirtieron en gigantes marinos. El rico tapiz que componen hoy los placentarios (entre los que nos incluimos nosotros) tiene su origen en esa época.

Steve Brusatte es profesor de paleontología en la Universidad de Edimburgo y autor de *The rise and reign of the mammals*, una nueva historia sobre la evolución de los mamíferos (Mariner Books, 2022).



EN NUESTRO ARCHIVO

Los primeros mamíferos placentarios. Maureen A. O'Leary en *IyC*, enero de 2015.
El éxito evolutivo de los mamíferos. Stephen Brusatte y Zhe-Xi Luo en *IyC*, junio de 2016.



ASTROFÍSICA

LA BÚSQUEDA ASTRONÓMICA DE MATERIA OSCURA

Chanda Prescod-Weinstein | Si la materia invisible del cosmos no aparece en los experimentos de detección directa ni en los colisionadores de partículas, tendremos que estudiarla en el espacio

MONDOLITHIC STUDIOS

«¿Cómo crees que podemos resolver el problema de la materia oscura?», me preguntó con premura Vera C. Rubin, a los pocos minutos de que nos presentaran en la conferencia Mujeres en Astronomía de 2009. No consigo recordar qué respondí. Me quedé abrumada: la famosa astrónoma que había ganado la Medalla Nacional de Ciencia de Estados Unidos por hallar la primera prueba concluyente de la existencia de la materia oscura me estaba consultando a mí, una estudiante de doctorado de veintitantos años. Estoy segura de que mi contestación no fue demasiado afortunada, porque hasta entonces no había pensado con detenimiento en ese problema. Nunca se me había ocurrido que tuviera derecho a opinar sobre el tema, hasta que Rubin me pidió que lo hiciera.

Si la decepcioné con mi respuesta, no me lo hizo notar. Me invitó a almorzar con ella y otras astrónomas, entre ellas la exadministradora de la NASA Nancy Grace Roman. Rubin mostró a las claras su admiración por Roman, de quien suele decirse que es «la madre del telescopio espacial Hubble». Fue toda una experiencia ver cómo una mujer que peinaba canas y había desvelado uno de los mayores misterios científicos de nuestro tiempo nos presentaba entusiasmada a su propia heroína.

El legado de Rubin se forjó en la década de 1960, cuando estudió el movimiento de rotación de las galaxias y halló algo extraño: las estrellas situadas en la periferia de las galaxias se movían más rápido de lo que debían, como si a la atracción gravitatoria de la materia ordinaria se sumase la de otra materia invisible [*véase* «Materia oscura en galaxias espirales», por Vera C. Rubin; Investigación y Ciencia, agosto de 1983]. Este resultado coincidía con los que había obtenido Fritz Zwicky a comienzos de los años treinta en sus estudios sobre cúmulos de galaxias, los cuales lo habían llevado a postular la existencia de *Dunkle Materie* («materia oscura» en alemán). A lo largo de los setenta, Rubin y el astrónomo Ken Ford publicaron una serie de datos que apoyaban esa conclusión, y a principios de la década siguiente ya se había llegado a un amplio consenso científico: la física tenía un problema con la materia oscura.

Los intentos de detectar la materia oscura en el laboratorio se dividen principalmente en tres categorías. Los experimentos de detección directa buscan colisiones entre partículas de materia oscura y partículas de materia ordinaria (por ejemplo, átomos de xenón), mediadas por la fuerza débil —una de las cuatro interacciones fundamentales— o alguna hipotética nueva fuerza. Los experimentos en colisionadores, como los que se llevan a cabo en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, adoptan el enfoque opuesto: hacen chocar dos partículas de materia ordinaria con la esperanza de que se produzcan partículas de materia oscura. Por último, los experimentos de detección indirecta tratan de observar las partículas que generaría la materia oscura al chocar consigo misma.

Hasta ahora, ninguna de estas estrategias ha dado con la materia oscura. Aún no sabemos si esta puede interactuar con la materia ordinaria por medio de alguna fuerza que no sea la gravedad. Quizá sea imposible producirla en los aceleradores que podemos construir o detectarla en los experimentos que podemos diseñar. Por eso, las observaciones astronómicas (los sondeos cósmicos de la materia oscura) constituyen una de nuestras mayores esperanzas. Esos sondeos nos permiten buscar las huellas de la materia oscura en entornos difíciles de recrear en la Tierra, como el interior de las estrellas de neutrones, y estudiar su comportamiento gravitatorio en una gran variedad de circunstancias.

A pesar de que ese planteamiento para el estudio de la materia oscura es muy prometedor, en ocasiones se ha visto atrapado en tierra de nadie, entre medias de las comunidades física

EN SÍNTESIS

La mayor parte de las teorías suponen que la materia oscura está compuesta por algún tipo de partícula, como las partículas masivas que interaccionan débilmente (WIMP), los axiones o los neutrinos estériles.

Los métodos que se usan habitualmente para tratar de desvelar la naturaleza de la materia oscura suponen que esas partículas interactúan con las de materia ordinaria por medio de alguna fuerza no gravitatoria.

Esos esfuerzos aún no han tenido éxito, por lo que nuestra mayor esperanza de continuar aprendiendo cosas sobre la misteriosa sustancia podría residir en las observaciones astronómicas.

Para poner en práctica esa estrategia, es necesario convencer a los legisladores de las posibilidades que entraña la búsqueda astrofísica de la materia oscura, a fin de conseguir la financiación necesaria.

En busca de materia oscura

Los científicos saben que hay más materia aparte de la que vemos, pero los intentos de encontrar esa materia oscura y desvelar su naturaleza aún no han tenido éxito. La búsqueda continúa.

Cuatro formas de buscar materia oscura

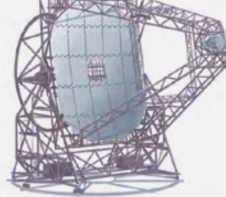
Los experimentos de detección directa, como Xenon1T en Italia, buscan indicios de interacciones mediadas por la fuerza débil entre una partícula de materia oscura y otra de materia ordinaria. Los colisionadores de partículas, como el LHC del CERN, hacen chocar partículas conocidas y tratan de hallar partículas de materia oscura entre los restos. Los experimentos de detección indirecta, como el Sistema Estereoscópico de Alta Energía (HESS) de Namibia, buscan signos de que la materia oscura interactúa consigo misma y produce materia ordinaria; eso, a menudo, conlleva estudiar el resultado de los choques entre las partículas cósmicas y las de la atmósfera. Todos estos métodos requieren que la materia oscura presente alguna interacción (además de la gravitatoria) con la materia ordinaria. Si eso no ocurre, la observación de objetos astrofísicos podría ser la única manera de explorar esta sustancia oculta.



Experimentos de detección directa



Colisionadores de partículas



Experimentos de detección indirecta



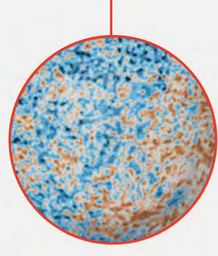
Señales astrofísicas



Núcleos de galaxias
Si la materia oscura es su propia antipartícula, como puede ocurrir en los modelos de partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP), se aniquilaría a sí misma en los centros galácticos, creando un exceso de rayos gamma que los telescopios podrían registrar.



Cúmulos de galaxias
Ese mismo fenómeno (la destrucción de las WIMP al interactuar entre ellas) podría apreciarse en los cúmulos de galaxias, donde también se espera que haya grandes concentraciones de materia oscura.



El CMB
El fondo cósmico de microondas (CMB) es una antigua luz que permea el universo. Las pequeñas variaciones en la temperatura de esa radiación reflejan la cantidad de masa que había en el universo temprano, y eso impone restricciones sobre los distintos modelos de materia oscura.



Lentes gravitatorias
Los cuerpos masivos actúan como «lentes gravitatorias», curvando los rayos de luz que pasan cerca de ellos. Los científicos pueden estudiar ese fenómeno para estimar la cantidad de materia oscura que lo produce y averiguar de qué podría estar hecha.



Estrellas de neutrones
Los núcleos de estos densos astros rotantes podrían generar axiones (un candidato a materia oscura), los cuales se descompondrían en fotones que los telescopios podrían detectar. Eso también haría que las estrellas de neutrones cedieran calor de un modo apreciable.

MATTHEW TWOMBLY

y astronómica. Los físicos tienden a centrarse en los colisionadores y los experimentos de laboratorio, y no siempre dan prioridad a las implicaciones astrofísicas. Y los astrónomos suelen considerar que la materia oscura es un problema de la física de partículas. Este desapego acaba afectando a la financiación, pero en 2022 tenemos la oportunidad de cambiar eso, gracias a un importante proceso de planificación llamado Snowmass. Este ejercicio, que se lleva a cabo aproximadamente una vez cada década, reúne a la comunidad de físicos de partículas

para que expliquen sus proyectos ante un comité nombrado por el Congreso de EE.UU. con el fin de determinar las prioridades científicas de ese país. Y, por primera vez, los sondeos cósmicos de la materia oscura constituyen un tema en sí mismos. Aunque Snowmass no hace recomendaciones políticas formales, no hay duda de que en cada nivel de la jerarquía organizativa se tomarán decisiones sobre las iniciativas científicas que merecen más atención.

Los sondeos cósmicos nos permiten buscar las huellas de la materia oscura en entornos difíciles de recrear en la Tierra, como el interior de las estrellas de neutrones

Un universo de candidatos

Todavía ignoramos muchas cosas sobre la materia oscura, pero hemos recorrido un largo camino desde el trabajo de Rubin en los años setenta y ochenta. Hoy tenemos indicios sólidos de que cada galaxia se halla en su propia burbuja o «halo» de materia oscura, que se extiende mucho más allá de la parte visible de la galaxia. La cantidad de materia oscura en estos sistemas galaxia-halo supera con mucho a la que vemos en las estrellas, los planetas y el gas. En términos más cuantitativos, todas las partículas que hemos podido identificar en laboratorios y colisionadores (que conforman el llamado modelo estándar de la física de partículas) no constituyen sino un 20 por ciento de la materia del universo. Si, además, tenemos en cuenta la energía oscura y el hecho de que la materia y la energía son básicamente equivalentes, llegamos a la conclusión de que entendemos tan solo alrededor de un 4 por ciento del cosmos. El modelo estándar representa un logro asombroso, pero todo parece indicar que es incompleto. Necesitamos una nueva partícula, o varias, para resolver el problema.

Ahora disponemos de toda una gama de candidatos a constituir la materia oscura. La mayoría de los físicos se inclinan por la idea de la «materia oscura fría», formada por partículas que se mueven a velocidades relativamente bajas, mucho menores que la de la luz. Dentro de esta clase, uno de los modelos más estudiados es el de las partículas masivas que interaccionan débilmente (WIMP, por sus siglas en inglés). Estas hipotéticas partículas se habrían producido de forma natural en el universo temprano e interactuarían con la materia ordinaria a través de la fuerza débil. En los modelos más populares, las WIMP son fermiones, el mismo tipo de partículas que los electrones o los quarks.

Durante mucho tiempo, las WIMP se han considerado el principal candidato a materia oscura, en particular en Estados Unidos. Sin embargo, muchos expertos han cambiado de opinión en los últimos años, al no haberse hallado indicios de WIMP en el LHC, ni en ninguno de los experimentos de detección directa o indirecta.

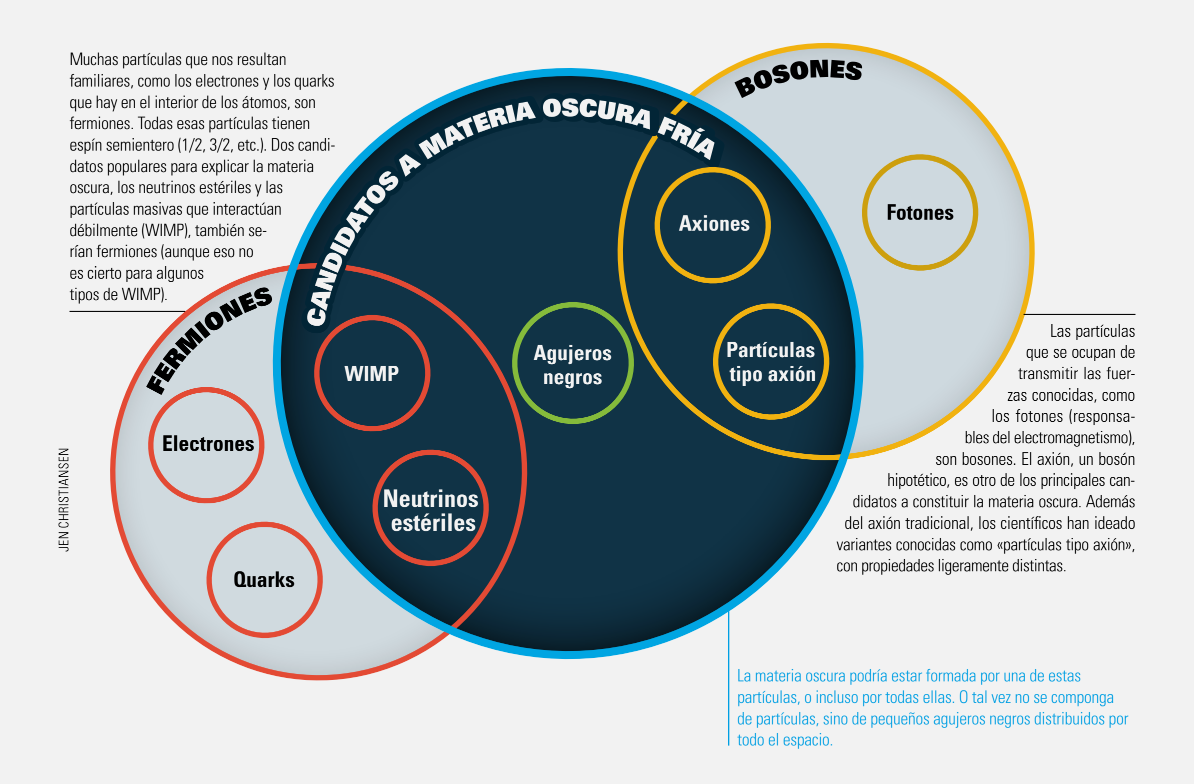
Entre los físicos de partículas ha ido ganando terreno otro candidato hipotético: el axión. Se espera que los axiones sean mucho más ligeros que las WIMP y, a diferencia de estas, no son fermiones, sino bosones, la misma clase de partículas que los fotones que constituyen la luz. En tanto que bosones, los axiones tienen propiedades muy distintas a las de las WIMP, lo cual abre la puerta a una posibilidad intrigante respecto a las estructuras que podrían formar. Los axiones fueron lo que me atrajo al mundo de la investigación en materia oscura.

Alternativas atractivas a las WIMP

Entre mi conversación con Vera Rubin y mi primer intento de responder a la pregunta que ella había formulado pasaron cinco años. Para entonces ya estábamos en 2014, y yo trabajaba como investigadora posdoctoral en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), adscrita primero al Instituto Kavli de Astrofísica e Investigación Espacial y luego al Centro de Física Teórica (CTP), y buscaba un problema interesante que estudiar. Fue allí donde empecé a hablar con Mark Hertzberg, que por entonces también era investigador posdoctoral en el CTP, sobre un debate que había surgido entre los físicos: ¿po-

¿Bosones o fermiones?

Los científicos tienen un sinfín de teorías sobre lo que podría ser la materia oscura. La mayoría de ellas suponen que la misteriosa sustancia consta de partículas aún por descubrir, las cuales pueden ser de dos clases: bosones o fermiones.



dían los axiones formar un estado exótico de la materia llamado «condensado de Bose-Einstein»? [*véase* «El condensado de Bose-Einstein», por Eric A. Cornell y Carl E. Wieman; Investigación y Ciencia, mayo de 1998].

Esa eventualidad surge de una diferencia fundamental entre los bosones y los fermiones. Estos últimos obedecen al principio de exclusión de Pauli, lo que significa que dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado cuántico. Esta es la razón por la que los electrones de un átomo se organizan en complicados orbitales con distintas energías. Los axiones, en cambio, sí pueden compartir un estado cuántico. En consecuencia, si los enfriamos lo suficiente, pueden adoptar todos el mismo estado de baja energía y comportarse colectivamente como una sola superpartícula, lo que se conoce como un condensado de Bose-Einstein. La posibilidad de que eso ocurra de manera natural en el espacio me parece fascinante.

Los axiones fueron postulados en la década de 1970 por el director de tesis de Hertzberg en el MIT, Frank Wilczek, que fue uno de los primeros en percatarse de que un modelo propuesto por Helen Quinn y el difunto Roberto Peccei implicaba la existencia de una nueva partícula. Wilczek la llamó «axión», a partir de una marca de detergente para la ropa. Así pues, Hertzberg ya estaba bastante familiarizado con los axiones. Para mí, por el contrario, era una idea relativamente nueva: había pasado la mayor parte de mi carrera centrada en otros temas y ahora tenía que ponerme al día. Por el camino, aprendí a distinguir entre el axión «tradicional» y la clase de partículas a las que los físicos han dado en llamar «partículas tipo axión».

El axión tradicional aparece en la teoría de Peccei y Quinn, que es una extensión de la cromodinámica cuántica (QCD). La QCD, que describe la interacción fuerte (otra de las cuatro fuerzas

fundamentales), es una teoría tremendamente exitosa, pero también predice algunos fenómenos que no se han observado nunca. El trabajo de Peccei y Quinn resuelve este problema y, al mismo tiempo, proporciona un mecanismo para producir la materia oscura. Pero la teoría de cuerdas también propone una serie de partículas con la misma estructura matemática que el axión original, las cuales se conocen como partículas tipo axión. El axión tradicional de la QCD tendría una masa de unos 10^{-35} kilogramos (varios órdenes de magnitud menor que la del electrón), mientras que los axiones de la teoría de cuerdas pueden ser mucho más ligeros y llegar a unos 10^{-63} kilogramos.

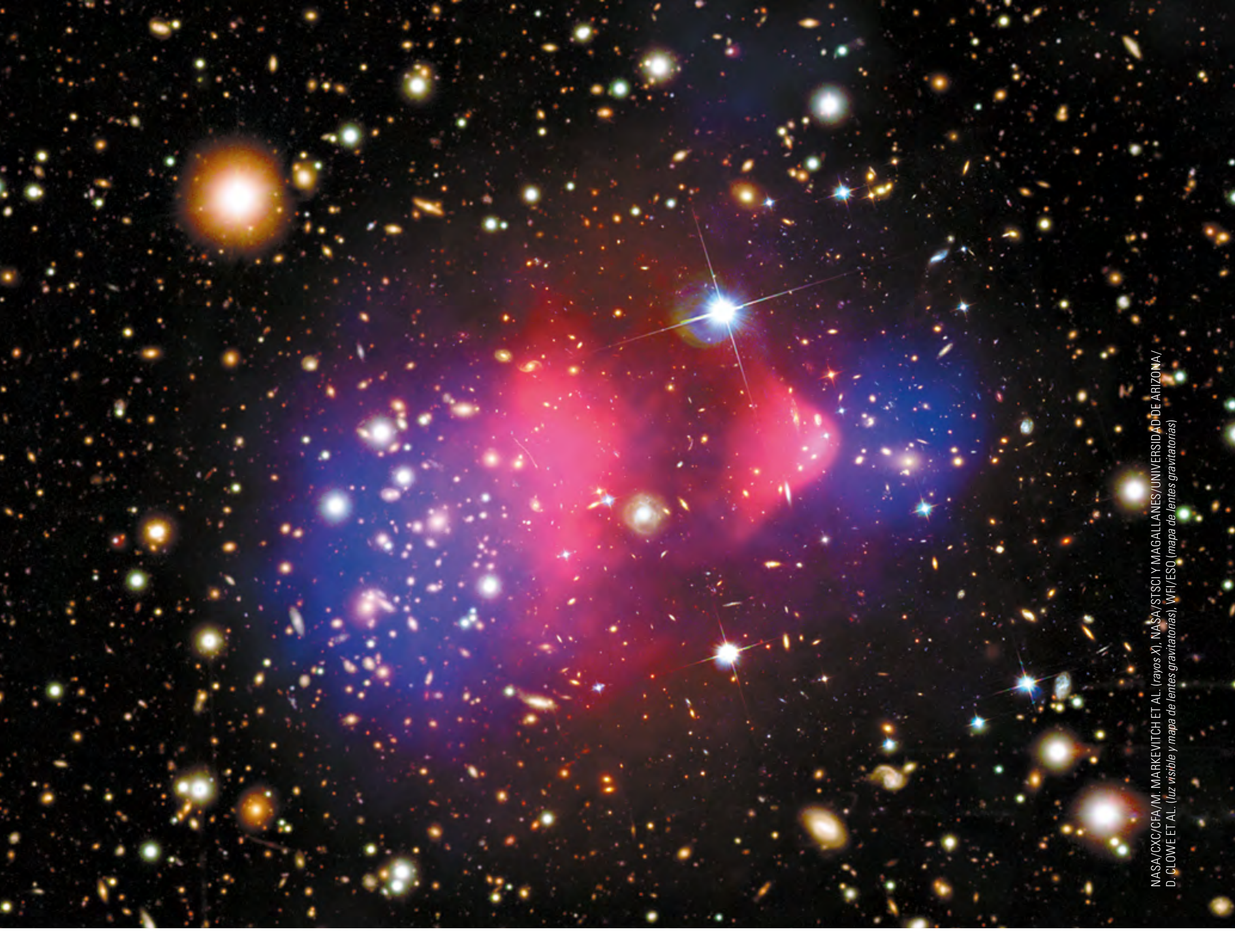
El trabajo que hicimos Hertzberg y yo, junto con nuestro supervisor Alan Guth, nos llevó a cuestionar una idea extendida sobre el modo en que los axiones podrían formar condensados de Bose-Einstein. El eminente físico Pierre Sikivie, de la Universidad de Florida, había causado un gran revuelo en 2009, cuando propuso que los axiones de la QCD habrían formado grandes condensados en los primeros instantes del universo. De acuerdo con sus cálculos, esos condensados habrían dado lugar a halos galácticos con forma de anillo, en vez de los halos esféricos que la mayoría de astrónomos tienen en mente y que predicen los modelos de WIMP. Si eso fuese cierto, sería posible inferir la composición de la materia oscura sin más que observar la forma de los halos.

Pero cuando Mark, Alan y yo intentamos reproducir los cálculos de Sikivie y su grupo, llegamos a una conclusión radicalmente distinta. Si bien estábamos de acuerdo en que los axiones habrían constituido condensados de Bose-Einstein en el universo temprano, estos serían mucho más pequeños, del tamaño de un asteroide. Nuestro modelo tampoco daba ninguna pista sobre qué tipo de estructuras axiónicas podríamos hallar hoy en día, miles de millones de años más tarde. Determinar si es posible que unos pequeños condensados del tamaño de un asteroide acaben dando lugar a los halos galácticos actuales, y modelizar cómo podría suceder, constituye un inmenso reto computacional.

El mismo año que se publicó nuestro artículo, otros investigadores estaban estudiando algunas consecuencias interesantes de las partículas tipo axión. Un equipo dirigido por Hsi-Yu Schive, de la Universidad Nacional de Taiwán, presentó simulaciones por ordenador de unas partículas de esa clase a las que se suele denominar «axiones ultraligeros» o «materia oscura difusa», porque su masa es muy pequeña y se comportarían como ondas, más que como partículas puntuales. Schive y sus colaboradores mostraron que esas partículas formarían halos de materia oscura similares a una onda, con un condensado de Bose-Einstein en el centro. El artículo de Schive hizo que resurgiera el interés por los axiones ultraligeros y generó esperanzas de que las observaciones astrofísicas pudieran detectar signos del carácter ondulatorio de los halos.

Hacer ciencia no es solo cuestión de cálculos, observaciones y experimentos, sino también de colaborar con otras personas, incluidos los responsables políticos

En la actualidad, los axiones y las partículas tipo axión figuran entre nuestros mejores candidatos a materia oscura, junto con las WIMP. Otra idea cada vez más popular es la materia oscura «autointeractuante» (SIDM, por sus siglas en inglés). Esta propuesta postula la existencia de partículas fermiónicas de materia oscura con algún tipo de interacción entre ellas (una autointeracción), además de la gravitatoria. Esas autointeracciones podrían dar lugar a halos con formas y estructuras más interesantes que las de una masa uniforme y esférica. Sin embargo, los detalles de esas estructuras son difíciles de predecir, y dependen de la masa y otras características de las partículas. Cabe destacar que los axiones también pueden interactuar entre sí, aunque de una manera distinta que la materia oscura fermiónica.



CÚMULO DE LA BALA: Las observaciones del telescopio espacial de rayos X Chandra muestran la distribución de materia ordinaria (*rosa*) tras la colisión de dos cúmulos de galaxias. Los estudios basados en lentes gravitatorias revelan que la mayor parte de la masa (*azul*) está separada de la materia ordinaria, lo cual constituye un indicio sólido de la existencia de la materia oscura.

Hay una alternativa a las WIMP, los axiones y la SIDM: los neutrinos. Aunque hoy sabemos que los neutrinos del modelo estándar son demasiado ligeros para dar cuenta de toda la materia oscura, esas partículas son reales y difíciles de detectar; en la práctica, eso las convierte en una pequeña componente de la materia oscura, a la que nos referimos como fondo cósmico de neutrinos. Además, se especula con la existencia de un nuevo tipo de neutrino que complementaría a los del modelo estándar: el neutrino estéril. Los neutrinos estériles se distinguen porque presentarían sobre todo interacciones gravitatorias y apenas experimentarían las fuerzas del modelo estándar. Esos neutrinos quizá sean el modelo más popular de lo que a veces se denomina «materia oscura templada» (aquella con propiedades intermedias entre las de la materia oscura caliente y la fría).

Otra idea que están empezando a contemplar los teóricos es que no haya una sola partícula de materia oscura, sino todo un «sector oscuro». Tal vez la materia oscura esté formada por axiones tradicionales, partículas tipo axión, WIMP, neutrinos estériles y SIDM, todo ello a la vez. Y otra posibilidad interesante es que la materia oscura se componga de agujeros negros de masa estelar surgidos en el universo temprano. Esta opción ha ido ganando enteros desde 2017, cuando comenzaron a detectarse ondas gravitacionales, ya que estas indican que los agujeros negros en ese intervalo de masas son más comunes de lo esperado.

Pistas en el firmamento

En astronomía, somos observadores relativamente pasivos. Podemos elegir los instrumentos que empleamos, pero no diseñar un proceso

galáctico o estelar para ver cómo se desarrolla. Los fenómenos cósmicos rara vez ocurren en escalas de tiempo manejables: la formación de galaxias dura miles de millones de años, y los procesos que podrían emitir partículas de materia oscura se alargan entre decenios y siglos.

Aun así, los sondeos astrofísicos de la materia oscura pueden darnos mucha información. El telescopio espacial Fermi de la NASA busca señales de rayos gamma que no podrían explicarse sin materia oscura. Las WIMP, por ejemplo, son sus propias antipartículas, así que se aniquilarían al chocar, igual que hacen la materia y la antimateria cuando entran en contacto. Esas explosiones deberían producir abundantes rayos gamma en las regiones donde hay materia oscura, en especial en los núcleos de las galaxias, que es donde más se concentra.

Y, de hecho, Fermi registra un exceso de rayos gamma procedentes del centro de la Vía Láctea, una detección que ha suscitado apasionados debates entre los astrofísicos teóricos y observacionales. Una posible interpretación es que estos fuegos artificiales sean el resultado de colisiones de la materia oscura consigo misma. Otra opción es que la señal provenga de estrellas de neutrones (las cuales suelen emitir radiación gamma a lo largo de sus vidas) situadas en la zona central de la Vía Láctea. Algunos astrofísicos se inclinan por esta explicación más mundana, pero otros creen que la señal está asociada a la materia oscura. Este desacuerdo no tiene nada de extraño, y yo misma no lo tengo muy claro. Me fascina el minucioso trabajo de las físicas Tracy Slatyer y Rebecca Leane en favor de la explicación de la materia oscura, pero, en última instancia, solo el análisis de observaciones más detalladas podrá decantar la balanza. Los futuros datos del telescopio Fermi y otros experimentos propuestos, como la misión AMEGO-X (Observatorio Explorador de Todo el Cielo en Rayos Gamma de Energía Media) de la NASA, tienen potencial para zanjar el debate.

El telescopio Fermi también se ha usado para buscar axiones. De acuerdo con la teoría, cuando los axiones se topan con un campo magnético, a veces se desintegran en fotones. Confiamos en observar indicios de esa luz, lo cual nos daría una prueba de que los axiones existen.

Las estrellas de neutrones son otro buen lugar donde buscar materia oscura. Algunas teorías sugieren que estos densos astros rotantes producen axiones cuando los protones y los neutrones chocan en sus núcleos. Esos axiones luego se descompondrían en fotones, que escaparían de las estrellas y podrían alcanzar nuestros instrumentos. Además, al cabo de decenas o cientos de años, este proceso de emisión de materia oscura produciría un enfriamiento característico de la estrella, que podríamos medir si esperamos lo suficiente. Otro tema candente es la posibilidad de que en las estrellas de neutrones se acumule materia oscura no axiónica que afecte a la propia estructura de la estrella. Como miembro de la colaboración NICER (Explorador de la Composición Interior de las Estrellas de Neutrones), de la NASA, lidero un proyecto que usa datos de un pequeño telescopio de la Estación Espacial Internacional para buscar indicios de materia oscura en el interior o alrededor de esos astros.

Casi cualquier observación astronómica a gran escala tiene algo que decirnos acerca de la materia oscura

Para aprender más sobre la naturaleza de la materia oscura, también podemos estudiar la mejor prueba de su existencia que tenemos hasta la fecha: la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB). Se trata de una señal de radio que se originó en el universo primitivo y se encuentra alrededor nuestro, por todas partes. El CMB nos proporciona una instantánea de un momento temprano de la historia cósmica, y los patrones que vemos en esa foto reflejan la composición del universo cuando se creó. Y resulta que solo podemos explicar esos patrones si suponemos que había materia oscura. Los datos del CMB nos dicen qué fracción de la masa y la energía del universo corresponde a la materia oscura, e incluso ayudan a acotar las posibles masas de sus partículas constituyentes. Mientras escribo este artículo, la colaboración CMB-S4 se prepara para usar una serie de telescopios situados en el desierto chileno de Atacama y en el Polo Sur con objeto de realizar medidas del CMB de una precisión sin precedentes.

Perspectivas futuras

Desde aquella conferencia de 2009, tanto Rubin como Roman han fallecido, pero su legado pervive en dos proyectos que tratarán de comprender mejor nuestro universo. El telescopio espacial Nancy Grace Roman de la NASA se lanzará hacia mediados de esta década y, aunque se centrará en el estudio de la aceleración cósmica (el problema de la energía oscura) y los exoplanetas, también nos dará información sobre la materia oscura. Al mismo tiempo, el observatorio Vera C. Rubin abordará muchas cuestiones abiertas desde el desierto de Atacama, entre ellas la búsqueda de la materia oscura que hizo famosa a Rubin.

En otras palabras, podemos ser optimistas de cara a los próximos años. Uno de los motivos es que casi cualquier observación astronómica a gran escala tiene algo que decirnos acerca de la materia oscura. Por ejemplo, un equipo de México liderado por Alma X. González Morales y Luis Arturo Ureña López, entre otros, demostró que podemos usar las lentes gravitatorias (cuerpos muy masivos que curvan el espaciotiempo hasta el punto de distorsionar la imagen de los objetos de fondo) para imponer restricciones sobre la masa del bosón que constituiría la materia oscura difusa. Tanto González Morales como Ureña López participan de forma activa en el Sondeo Patrimonial del Espacio y el Tiempo (LSST) del observatorio Rubin, donde investigan el efecto de lente gravitatoria e intervienen en el grupo de trabajo sobre la materia oscura. En ese grupo, estamos discutiendo futuras observaciones que permitirán obtener más información sobre los halos de materia oscura, que luego podremos comparar con simulaciones por ordenador de las distintas partículas candidatas. Del mismo modo, los estudios de la estructura a gran escala del universo que realizará el telescopio Roman nos ayudarán a entender cómo se comporta la materia oscura a escalas cosmológicas.

En el futuro, instrumentos de rayos X como STROBE-X (Observatorio Espectroscópico de Resolución Temporal para Rayos X de Energía de Banda Ancha) nos pueden ayudar a estudiar con más detalle la estructura de las estrellas de neutrones, de una manera que mejorará nuestra comprensión de las propiedades de la materia oscura. Otros proyectos propuestos, como el Observatorio de Todo el Cielo en Rayos Gamma de Energía Media de la NASA, o AMEGO (que no debemos confundir con AMEGO-X), harán lo mismo en otras longitudes de onda.

Yo tomaré parte activa en el grupo de trabajo de Snowmass dedicado a los sondeos cósmicos de la materia oscura, no solo como científica, sino también como coordinadora, junto con Alex Drlica-Wagner y Hai-Bo Yu. Es nuestra responsabilidad transmitir la emoción y las posibilidades de las búsquedas astrofísicas de materia oscura a los responsables de tomar decisiones en materia de financiación. El documento que ayudaré a redactar puede influir en las indicaciones que reciban la Fundación Nacional de Ciencias y el Departamento de Energía de EE.UU. sobre el rumbo de la investigación científica en la próxima década.

Casualmente, la comunidad astronómica acaba de completar un proceso similar a Snowmass, la Encuesta Decenal de Astronomía y Astrofísica de 2020. El informe resultante no aborda de manera sustancial el problema de la materia oscura, pero sí ofrece un gran respaldo a los esfuerzos por cartografiar mejor el CMB, los instrumentos para estudiar las estrellas de neutrones y los observatorios de rayos X, tres aspectos que nos ayudarán a entender mejor la materia oscura.

Hacer ciencia no es solo cuestión de cálculos, observaciones y experimentos, sino también de colaborar con otras personas, incluidos los responsables políticos. El alcance de nuestros avances científicos dependerá, en parte, del apoyo que recibamos de los legisladores. Desde luego, resulta estresante pensar en estas cosas. Por suerte, hay todo un universo sobre el que hacerse preguntas, y tratar de comprender la materia oscura es francamente entretenido.

Chanda Prescod-Weinstein es física teórica. Es profesora de física y miembro del Departamento de Estudios sobre la Mujer y el Género en la Universidad de New Hampshire. Ha escrito *The disordered cosmos: A journey into dark matter, spacetime, and dreams deferred* (Bold Type Books, 2021).



EN NUESTRO ARCHIVO

Materia oscura compleja. Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln en *IyC*, septiembre de 2015.

Agujeros negros primordiales y materia oscura. Juan García-Bellido y Sébastien Clesse en *IyC*, septiembre de 2017.

Materia oscura axiónica. Leslie Rosenberg en *IyC*, marzo de 2018.

¿Qué es la materia oscura? Lisa Randall en *IyC*, agosto de 2018.

Neutrinos ocultos. William Charles Louis y Richard G. Van de Water en *IyC*, septiembre de 2020.

La materia oscura a la luz de los rayos gamma. Javier Coronado Blázquez y Miguel Ángel Sánchez Conde en *IyC*, diciembre de 2020.

La última batalla de la materia oscura. Clara Moskowitz en www.investigacionyciencia.es, 15 de abril de 2021.

LA GENIALIDAD DE LA SIESTA

Bret Stetka | Thomas Edison coqueteaba con Morfeo sin caer del todo en sus brazos como forma de estimular la creatividad. Investigaciones recientes indican que ese truco también podría servirnos a los demás



THOMAS EDISON se echa la siesta mientras el presidente de EE. UU. Warren Harding lee el periódico (1921).

Sabido es que a Edison le disgustaba el sueño. En una entrevista publicada en 1889 en *Scientific American*, el brillante inventor de la bombilla incandescente aseguró que nunca dormía más de cuatro horas seguidas. Dormir era una pérdida de tiempo para él.

Es posible que lo aprovechase para espolear su creatividad. Le gustaba echar una cabezada con una esfera de metal en cada mano, de modo que el ruido de la caída lo despertaba antes de quedar profundamente dormido. Ese era su modo de recordar lo que uno piensa cuando se adormece, que de lo contrario olvida.

Los investigadores del sueño creen que Edison intuía algo importante. Un estudio publicado hace poco en *Science Advances* señala que la mente humana experimenta un breve lapso de intelección y creatividad en el estado de semilucidez que precede al sueño, la fase denominada N1, o primera fase sin movimientos oculares rápidos («sin MOR»). Los resultados apuntan a que, si pudiéramos aprovechar ese estado liminal que caracteriza el entresueño, el estado hipnagógico, podríamos recordar más fácilmente las ideas que nos vienen a la cabeza.

Inspirados por Edison, Delphine Oudiette y su equipo, del parisino Instituto del Cerebro, presentaron a 103 participantes una serie de problemas matemáticos con una regla oculta que permitía resolverlos con gran rapidez. Las 16 personas que de entrada adivinaron la regla quedaron excluidas del estudio. A las demás les concedieron un descanso de 20 minutos durante el cual se relajaron reclinadas mientras sostenían un vaso en la mano derecha. Si se les caía al suelo, tenían que decir qué estaban pensando en ese instante.

Durante el descanso se les sometió a una polisomnografía, una técnica que registra las actividades encefálicas, oculares y musculares para valorar el estado de vigilia. Así se determinó qué participantes estaban despiertos y cuáles habían entrado en la fase N1 o en la N2, esta más profunda.

Al término del receso volvieron a los problemas matemáticos. Los que se habían adormecido hasta la fase N1 tuvieron tres veces más probabilidades de desentrañar la regla oculta que los que habían permanecido despiertos y casi seis veces más que quienes se durmieron hasta la fase N2. Ese «momento eureka», como lo llaman los autores, no fue inmediato, sino que sobrevino al cabo de varios intentos de resolución, algo que concuerda con estudios anteriores.

EN SÍNTESIS

Todo apunta a que durante el sopor que precede al sueño el cerebro experimenta una fase fugaz de intelección y creatividad.

Al parecer, personajes célebres como el inventor Thomas A. Edison, el físico Albert Einstein o el pintor Salvador Dalí supieron sacar provecho de ese fenómeno.

El estudio del período hipnagógico del sueño podría deparar avances en el conocimiento del cerebro, del pensamiento y de la creatividad.

Lo que no está tan claro es si la técnica de Edison, asir un objeto hasta que se le caía de la mano, funciona. De los 63 sujetos que dejaron caer el vaso, 26 ya habían superado la fase N1. Aun así, el estudio apunta a que, en efecto, atravesamos un trance de creatividad antes de dormirnos del todo.

Oudiette explica que, como a Edison, su experiencia le inspiró el estudio: «Siempre he tenido muchas experiencias hipnagógicas, vivencias oníricas que me fascinan desde hace mucho. Me sorprendió que casi nadie hubiera estudiado esta fase del sueño en las últimas dos décadas».

Un estudio publicado en 2018 dio a conocer que un breve período de «quietud consciente» (o descanso en silencio) aumentaba la probabilidad de descubrir la misma regla matemática con la que se solucionaba el problema de Oudiette. Por su parte, la psicóloga Penny Lewis, de la Universidad de Cardiff, plantea que tanto la fase de movimientos oculares rápidos (MOR), en la que movemos los ojos en todas direcciones, como las demás fases de sueño lento cooperan para resolver problemas.

De todas formas, Oudiette no conoce otros estudios que examinen la conexión de la duermevela con la creatividad, pero sí menciona diversos ejemplos históricos que ilustran este fenómeno.

«Es posible que Alejandro Magno y Albert Einstein utilizasen la técnica de Edison, o eso se cuenta. Y algunos de los sueños que inspiraron grandes descubrimientos pudieron ser experiencias hipnagógicas en vez de sueños nocturnos. Un ejemplo famoso es el del químico August Kekulé, que descubrió la estructura anular del benceno después de ver una serpiente que se mordía la cola, adormecido mientras trabajaba hasta altas horas de la madrugada.»



FORD FOUNDATION

EDISON solía hacer recesos breves durante la jornada de trabajo en su laboratorio de Nueva Jersey, pero procuraba no pasar demasiado tiempo dormido.

Salvador Dalí también adoptó una variante del método de Edison: sostenía una llave por encima de un platito de metal, que tintineaba si se le caía, algo que espoleaba su imaginación artística.

«Esta investigación nos da pistas sobre el vínculo entre la consciencia y la creatividad», afirma Adam Haar Horowitz, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), que ha diseñado técnicas para interactuar con los estados hipnagógicos, pero que no participó en el estudio de Oudiette. Y añade: «Lo importante es que se trata del tipo de experimento que uno mismo puede probar en casa: coja un objeto de metal, acuéstese, concéntrese en un problema creativo y espere a ver si viene ese momento "eureka"».

A Jonathan Schooler, psicólogo de la Universidad de California en Santa Bárbara, ajeno también al proyecto, le parece que el estudio no demuestra que cualquiera sea capaz de sacar provecho de su creatividad en las primeras fases de somnolencia. Apunta que «reposar en ese "estado dulce" podría haber refrescado a los participantes, nada más, y por eso les resultó más fácil resolver el problema luego». Con todo, reconoce que podría haber algo trascendental en lo observado: «Los resultados indican que, a medida que nos adormecemos, atravesamos por un momento de gran creatividad en el que estamos lo bastante dormidos para acceder a elementos que de ordinario quedan fuera de nuestro alcance, pero al mismo tiempo lo bastante despiertos para poder recordarlos».

Pese a la creencia común de que el cerebro descansa cuando dormimos, durante el sueño se despliega una espectacular actividad neuronal. Las neuronas siguen enviando miles de millones de impulsos eléctricos, lo que nos ayuda a clasificar y archivar los recuerdos y, según parece, a articular nuestras propias creaciones mentales.

Oudiette no solo confía en corroborar sus descubrimientos en futuros estudios, sino también en averiguar si el estado hipnagógico nos ayudaría a resolver tareas y problemas, al encauzar el potencial creativo del entresueño. En su grupo están valorando la posibilidad de usar interfaces cerebro-informáticas para observar con precisión las ondas encefálicas del inicio del sueño y saber cuándo despertar a una persona que transita por el supuesto momento de máxima intelección.

«Quizás aprendamos a alcanzar ese estado creativo», vaticina Oudiette. «Por ejemplo, con un sonido que nos avise cuando estemos en el momento idóneo y otras alertas cuando iniciemos el sueño franco. Tales métodos podrían enseñarnos a reconocer nuestro estado de creatividad y a sumergirnos en él.»

Bret Stetka es licenciado en medicina, redactor y director editorial de Medscape Neurology. Ha publicado en *Wired*, NPR y *The Atlantic*.



EN NUESTRO ARCHIVO

Actividad cerebral durante el sueño. Robert Stickgold y J. M. Ellenbogen en *MyC*, n.º 41, 2010.

Despierta la hipnopedia. Ken A. Paller y Delphine Oudiette en *IyC*, enero de 2019.

HISTORIA DE LA CIENCIA

EL RETORNO DEL CIELO DE SALAMANCA

Arte y astronomía en la bóveda de la antigua biblioteca universitaria salmantina

Carlos Tejero Prieto

El 13 de junio de 1472, el claustro de la Universidad de Salamanca trató sobre la construcción de una nueva biblioteca. Este era un proyecto ya antiguo, que se había ordenado llevar a cabo en la universidad en las constituciones que en 1411 le otorgó el papa Benedicto XIII de Aviñón. Conocido como el papa Luna, su nombre era, en realidad, Pedro Martínez de Luna y Pérez de Gotor. Natural de Illueca (en lo que hoy es la provincia de Zaragoza), estudió en la Universidad de Montpellier, en la que se doctoró y posteriormente fue profesor de derecho canónico. Su labor en pro de ordenar la actividad de la Universidad de Salamanca sería clave para situarla en la vía que la convertiría en una de las más importantes de toda Europa en el siglo XVI. (Las contribuciones del papa Luna fueron tan importantes que ha sido considerado el tercer fundador de la Universidad de Salamanca, a la par que el rey Alfonso IX, que estableció el Estudio General salmantino en 1218, y su nieto Alfonso X el Sabio, que le otorgó la Carta Magna en 1254 y que un año más tarde consiguió que el papa Alejandro IV concediera validez universal a los grados por ella conferidos y el privilegio de tener sello propio.)

Así, en las constituciones de la Universidad también se especificaba que esta debía contar con un edificio propio. Ello dio origen al edificio de las Escuelas Mayores, al que después se le añadiría la fachada plateresca en la que hoy en día es habitual encontrar grupos de turistas que se afanan por hallar la famosa rana. Si cabe, todavía más importante para nuestro relato es el mandato contenido en dichas constituciones que especificaba que la universidad debía instituir una cátedra de astrología. (En aquella época, la astrología —sinónima entonces de astronomía— constituía una de las siete artes liberales y se creía que su conocimiento era indispensable para el correcto ejercicio de la medicina).

La antigua biblioteca

Pero volvamos a la reunión del claustro. En ella se expuso que hacía mucho tiempo que se había mandado construir la biblioteca del Estudio y que no se hubiera comenzado ya era un gran daño, oprobio y vergüenza para la universidad. A pesar de estas palabras, no sería hasta diciembre de 1473 cuando se dotaría económicamente el proyecto y se comenzaría a buscar un maestro de obras del que tenemos noticias en junio de 1474. Se acordó entonces que la biblioteca estuviera cerrada por una bóveda.

Las obras progresaron lentamente, construyéndose la biblioteca en un primer piso sobre la capilla de la universidad. En septiembre de 1479, el *Libro de claustros* recoge la orden de pago al maestro Abrayme por el cierre de la bóveda, así



***El Cielo de Salamanca* puede contemplarse, desde su restauración en 1952, en el Patio de las Escuelas Menores de la Universidad de Salamanca.**

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA / SANTIAGO SANTOS

que, tradicionalmente, se ha considerado que el fin de las obras de la biblioteca ocurrió en torno a dicha fecha.

La bóveda de Abrayme tenía una longitud de 23 metros, una anchura de 8,70 metros y la altura desde su base era de 4,45 metros. Estaba rematada en sus extremos por cuartos de esfera ochavada, unidos por una bóveda de cañón que contenía dos arcos fajones de sillería. Su superficie total rondaba los 400 metros cuadrados.

El programa iconográfico

El hecho de que la biblioteca se cerrara mediante dicha bóveda, en lugar de las tradicionales cubiertas de madera o las bóvedas de crucería, implica que desde el inicio se tenía proyectado decorarla con pinturas.

No sabemos cuándo se decoró la imponente bóveda al haberse perdido los *Libros de claustros* de entre 1482 y 1506. Disponemos de 1494 como un *terminus ante quem* gracias al viajero Hieronymus Münzer, que, partiendo de Núremberg el 2 de agosto de 1494 realizó un viaje de más de 7000 kilómetros en el que recorrió Alemania, Suiza, Francia, España, Portugal, Francia, Bélgica y Alemania, para regresar a Núremberg el 15 de abril de 1495. Su libro de viaje (*Itinerarium siue peregrinatio excellentissimi viri artium ac vtriusque medicine doctoris Hieronimi Monetarii de Feltkirchen ciuis Nurembergensis*) nos dice que estuvo en Salamanca entre el 3 y el 4 de enero de 1495, y relata que:

«Hay, además, un colegio de bella apariencia recientemente construido a expensas del rey, todo de piedra de sillería, con disposición semejante a la de un monasterio y con catedráticos grandemente famosos. Tiene amplia biblioteca abovedada, en cuya parte más alta vense unas pinturas que representan los signos del zodiaco.»

Por tanto, la bóveda de Abrayme se pintó en algún momento entre 1482 y 1494. Aun así, todo parece indicar que la decoración se ejecutó entre 1483 y 1486.

Lucio Marineo Siculo, profesor de la universidad entre 1486 y 1496, describe la bóveda al hablar del edificio de las Escuelas Mayores en su obra *De Hispaniae Laudibus* (1497):

«Sobre este lugar está una biblioteca hermosísima en cuya bóveda puede contemplarse con gran deleite de los espectadores, el cielo



Imagen del proyecto de conservación digital del *Cielo de Salamanca*, que se basa en escaneados láser y fotogramétricos.

estrellado, los planetas y la bóveda celeste con todas las constelaciones del zodiaco».

Más tarde, Diégo Pérez de Mesa, en su *Libro de las grandezas y cosas memorables de España* (1590), nos relata:

«En estas escuelas mayores hay una capilla muy rica de boveda. En lo alto de ella, que es de color azul muy fino están pintadas, y labradas de oro las cuarenta y ocho imágenes de la octava esfera, los vientos, y casi toda la fábrica y cosas de la astrología.»

Gracias a estas descripciones sabemos que en la bóveda de la antigua biblioteca se pintaron las 48 constelaciones descritas por Ptolomeo en el Almagesto, junto con los siete planetas que se conocían en el siglo xv: el Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

Arte científico para la enseñanzade la astrología

Tras la llegada en torno a 1460 del primer catedrático de astrología Nicolás Polonio, la cátedra desarrolló una intensa actividad, desempeñando un papel muy relevante en lo que restaba del siglo xv y durante todo el siglo xvi.

Como hemos comentado, en la bóveda salmantina se representó la concepción del universo anterior a la revolución copernicana. No existe nada similar en la historia universitaria europea de la época. Lo habitual entonces era que las bibliotecas universitarias se decorasen con las siete artes liberales. Esta singularidad en la elección del programa iconográfico da testimonio de la gran importancia que en muy pocos años había adquirido en Salamanca la cátedra de astrología.

Pero no era solo una obra de arte. Era también una obra científica: un planetario cuyo primer y fundamental objetivo era la enseñanza práctica de la astrología.

Tiempos de cambio

En 1506 se eliminó el suelo de la biblioteca para que el edificio se usara solo como capilla. Además, se encargó a Juan de Yprés la reparación de los desperfectos que la humedad había causado a la bóveda astrológica. La intervención empeoró las cosas al eliminar las estrellas en relieve que enmarcaban las constelaciones y realizar un repinte completo de la obra.

En 1763 se acordó reformar la capilla para adaptarla a los gustos de la época. Se decidió construir una nueva bóveda situada unos 4 metros por debajo de la original, con objeto de preservar esta. El proceso de reforma ocasionó el derrumbe de casi dos tercios de la bóveda astrológica.

No era solo una obra de arte. Era también una obra científica: un planetario cuyo primer y fundamental objetivo era la enseñanza práctica de la astrología

La obra quedó en el olvido hasta que el profesor Antonio García Boiza descubrió en 1901 los restos de las pinturas. En 1950, los hermanos Josep y Ramon Gudiol Ricart procedieron a su arranque mediante la técnica del *strappo*. Tras su restauración, en 1952 se instalaron en su ubicación actual, en el Patio de las Escuelas Menores. Desde 1951, gracias al profesor Rafael Laínez Alcalá, esta parte conservada de la bóveda astrológica se conoce popularmente como *El Cielo de Salamanca*.

La configuración planetaria

El Cielo de Salamanca muestra cinco constelaciones zodiacales (Leo, Virgo, Libra, Escorpio y Sagitario), cuatro boreales (el Boyero, Hércules, Serpentario y Serpiente) y seis australes (Hidra, Cuervo, Cratera, Ara, Corona Austral y Centauro). Si en la parte conservada de la bóveda de la antigua biblioteca no figurara ningún planeta, entonces sería eterna. Es decir, representaría el cielo de cualquier momento a lo largo de la historia debido a que las posiciones relativas de las estrellas permanecen esencialmente fijas.

Sin embargo, tenemos al Sol en Leo, a Mercurio en Virgo y no hay más planetas en las cinco constelaciones zodiacales representadas. Ello restringe los períodos en que ocurre dicha configuración planetaria. ¿Corresponde *El cielo de Salamanca* a una fecha concreta? Los años y días en los que puede observarse reciben el nombre de «años y días del Cielo de Salamanca» y son extremadamente infrecuentes: en el período de 1100 años comprendido entre 1200 a.D y 2300 a.D hay solo 23.

Por tanto, en principio no sería posible realizar una datación única para el firmamento representado en la bóveda astrológica. Pero, teniendo en cuenta lo extremadamente infrecuentes que son los años del Cielo de Salamanca, es un hecho excepcional que en el corto período de construcción de la antigua biblioteca y la decoración de su bóveda (entre 1474 y 1486) haya uno, y solo uno, de dichos años en el que la configuración pudo observarse entre el 15 y el 28 de agosto: 1475. Así pues, estas evidencias circunstanciales parecen situar la datación en dicho período.

2022: Año del Cielo de Salamanca

También es remarcable que precisamente 2022 sea un año del Cielo de Salamanca, que hayan pasado 141 años desde el anterior (1881) y que para el siguiente habrá que esperar hasta 2060. Esta efeméride se conmemorará por todas las agrupaciones astronómicas salamantinas (Astróbriga, OSAE y Supernova). Y entre los días 21 y 24 de agosto se celebrará el Maratón del Cielo de Salamanca: comenzará con la observación de Mercurio tras la puesta de Sol; seguirá, en el transcurso de la noche, con Marte, Júpiter y Saturno, y concluirá al amanecer con la observación de Venus.

Carlos Tejero Prieto es profesor de geometría y topología en el Departamento de Matemáticas de la Universidad de Salamanca. Compagina esta labor con la divulgación de la astronomía.



PARA SABER MÁS

Las ciencias y la Universidad de Salamanca en el siglo xv. Cirilo Flórez Miguel en *Salamanca y su Universidad en el primer Renacimiento: Siglo xv, Miscelánea Alfonso IX.* Ediciones Universidad de Salamanca, 2010.

Apostillas a un debate historiográfico La capilla de San Jerónimo del Estudio de Salamanca. Lucía Lahoz Gutierrez en *Materia*, n.º 18-19, págs. 85-115, 2021.

La Real Capilla de San Jerónimo. José María Martínez Frías en *Loci et imagines. Imágenes y lugares: 800 años de patrimonio de la Universidad de Salamanca.* Ediciones Universidad de Salamanca, 2013.

Astronomía en la Universidad de Salamanca a finales del s xv. Lo que nos cuenta *El Cielo de Salamanca*. Carlos Tejero Prieto en *Revista Española de Física*, n.º 36, págs. 1-12, abril-junio de 2022.

Actividades **«2022 Año del Cielo de Salamanca»**

FORO CIENTÍFICO

LAS HEMBRAS DE LAS AVES TAMBIÉN CANTAN

Hacia una ornitología con perspectiva de género

Lauryn Benedict y Matt Wilkins

Las hembras de las aves cantan. Esta es la conclusión del estudio que realizamos en 2020 sobre una de las especies de aves más abundantes, con una distribución más extensa y mejor estudiadas de todo el mundo: la golondrina común. A pesar de que existen más de mil publicaciones científicas sobre esta especie, el canto de las hembras de golondrina nunca había sido protagonista de un artículo de investigación.

¿Por qué es significativo el hecho de haber ignorado el canto de la hembra de esta especie tan común? Pues porque es una demostración de la existencia de un sesgo científico muy arraigado y nos insta a reflexionar sobre su persistencia.

Desde los inicios de la investigación moderna sobre el canto de las aves, este campo se ha centrado en los llamativos cantos de los machos. La teoría evolutiva clásica supone que, en todo el reino animal, los machos compiten por el acceso a las hembras, lo que ha provocado que en ellos evolucionen rasgos muy exagerados (por ejemplo, los cuernos) que les ayudan en su lucha contra otros machos, además de servirles para atraer a las hembras (como las maravillosas plumas de los pavos reales). Los cantos de las aves pueden servir para ambos propósitos y, aunque los cantos de los machos suelen ser más elaborados que los de las hembras, esto no es, ni mucho menos, universal. De hecho, las hembras de casi el 64 por ciento de las aves canoras cantan, y sus cantos pueden servir para las mismas funciones que las de los machos.

A pesar de lo dicho, muchos investigadores siguen pensando que «el ave macho canta y la hembra elige», razón por la cual la inmensa mayoría de los estudios de campo se han centrado en el canto de ellos. Sin embargo, el canto más frecuente no tiene por qué ser siempre el más importante, de la misma manera que un debate se puede decidir por quién tuvo la última palabra en lugar de por quien habló más. Nuestro estudio sugiere que la evolución de los cantos de las golondrinas hembras es más importante que la evolución de los cantos de los machos a la hora de explicar por qué los cantos de ambos sexos son diferentes.

Otra razón por la que no se ha prestado la atención debida a las hembras canoras tiene en su origen un sesgo geográfico. Cualquier ornitólogo o especialista que trabaje en los trópicos le podrá confirmar que las hembras cantan, en algunas ocasiones, con tanta frecuencia como los machos. Pero los primeros investigadores solían estudiar especies que se encontraban cerca de sus universidades en el hemisferio norte. En muchas aves norteamericanas las hembras o han dejado de cantar o lo hacen ocasionalmente, lo que se explica por la adaptación evolutiva para conservar energía que dedicarán a la migración o a la cría de sus polluelos durante una breve temporada.

Una última razón por la que no se ha estudiado lo suficiente el canto de las hembras podría ser una cuestión de género. Los hombres han dominado la investigación sobre las aves canoras desde sus inicios. Sin embargo, con la incorporación gradual de más mujeres a este campo, cada vez se estudia más el canto de las hembras. Es más probable que un artículo científico sobre este tema esté encabezado por una mujer que por un hombre. La falta histórica de diversidad en cuanto a la participación en la ciencia puede


Una pareja de golondrinas comunes en pleno cortejo.

DUNCAN USHER/MINDEN PICTURES

haber contribuido a que los investigadores trabajen con asunciones que se autorreafirman y que nos impiden adquirir una comprensión global del mundo que nos rodea.

Para luchar contra estos prejuicios en el canon científico, necesitamos conseguir que la ciencia sea más accesible para todos. Por ejemplo, si logramos que la gente sea consciente de que las hembras de las aves también cantan, haremos que su experiencia en la naturaleza sea más completa y mejoraremos su capacidad para observarla. En muchas especies, incluida la golondrina común, si observamos al macho y a la hembra desde cierta distancia, veremos que se parecen, pero los distinguiremos por los sonidos que emiten. Las golondrinas hembras cantan, principalmente, antes de empezar la fase de reproducción, lo que, por ejemplo, puede ayudar a los observadores ornitológicos a seguir el proceso de anidación de la especie. Iniciativas de ciencia ciudadana como xeno-canto y eBird recogen cada año millones de observaciones y grabaciones de audio realizadas por aficionados. Las personas que estén al día sobre los últimos avances de la ciencia crearán mejores conjuntos mundiales de datos, lo que, a su vez, mejorará la ciencia.

Los no profesionales realizan mejores observaciones porque no están contaminados por ideas preconcebidas. Una de nosotros (Benedict) da charlas a menudo y ha descubierto que los observadores «expertos» de aves suelen dar por sentado que las hembras no cantan, mientras que los que no son tan profesionales tienden a pensar que sí pueden hacerlo. El contacto con la ciencia auténtica es ideal para atraer a los niños que aún no han asimilado los prejuicios existentes. Otro de nosotros (Wilkins) adaptó nuestra investigación sobre el canto de las hembras para poder dar una clase interdisciplinaria a niños y niñas de entre 10 y 17 años (disponible en galacticpolymath.com). En una ocasión, en una clase de matemáticas para niños y niñas de 10 a 11 años, Wilkins les contó que eran las primeras personas del mundo que analizaban un conjunto de datos de un estudio sobre cómo disminuye el tono vocal de las aves con el tamaño del cuerpo, y los niños empezaron a aplaudir espontáneamente.

¡Las hembras de las aves cantan! Debemos decirlo con tanta rotundidad porque es un reflejo de los avances de la ciencia a medida que se dispone de nuevos datos y se suman nuevas voces al debate. Esperamos que, en el futuro, la investigación, la comunicación y la educación trabajen conjuntamente para adquirir más conocimientos sobre nuestra conexión con el mundo natural.

Lauryn Benedict es profesora de ciencias biológicas en la Universidad del Norte de Colorado, donde dirige el Laboratorio de Ecología del Comportamiento.



Matt Wilkins es fundador y director ejecutivo de Galactic Polymath Education Studio.



HISTORIA DE LA TÉCNICA

LOS ORÍGENES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Ignacio Mártil de la Plaza | El largo camino desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico hasta las primeras células solares de silicio



THONGSUK ATIWANNAKUL/ISTOCK

El consumo de energía en el planeta no deja de crecer año tras año. En la actualidad, nos enfrentamos a un incremento de la demanda sin precedentes, debido al aumento de la población mundial y al mayor nivel de vida que disfruta una parte muy importante de ella. Disponer de energía barata y abundante sigue siendo crucial para el desarrollo económico de cualquier país, pero el incremento del consumo energético va indisolublemente unido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por la quema de combustibles fósiles, lo que eleva la temperatura del planeta y acelera el cambio climático.

Paliar esos efectos devastadores exige planes creíbles para descarbonizar los sistemas de producción de energía a escala nacional y regional [*véase* «Cómo descarbonizar la economía», por Óscar Arnedillo Blanco y Jorge Sanz Oliva; Investigación y Ciencia, junio de 2020]. Esos nuevos sistemas, además, deberán ser escalables, a fin de satisfacer la creciente demanda energética de una población que llegará a unos 9000 o 10.000 millones de personas hacia 2050, y quizás a más de 12.000 millones a finales de siglo. Todo ello pasa necesariamente por sustituir en la matriz energética las fuentes basadas en combustibles fósiles por otras renovables, entre las que la energía solar ocupa un lugar destacado.

En los últimos años, la energía solar fotovoltaica ha experimentado una enorme expansión, y sus costes se han reducido de forma notable. Pero, para alcanzar el grado de madurez actual, ha debido recorrer un periplo científico y tecnológico de casi dos siglos, salpicado de descubrimientos casuales y entrelazado con importantes momentos históricos, como la carrera espacial o las crisis del petróleo de los años setenta. En este artículo, repasaremos los principales hitos de esa singladura.

Los primeros dispositivos

El funcionamiento de las células solares se basa en el efecto fotovoltaico, es decir, en la aparición de una tensión y una corriente eléctricas al iluminar determinados materiales. El descubrimiento de este efecto se remonta al siglo xix, en concreto a 1839, cuando lo describió Edmond Becquerel (padre de Henri Becquerel, descubridor de los rayos catódicos y nóbel de física en 1909. Cabe destacar que en esa familia hubo tres generaciones de científicos de primer nivel).

EN SÍNTESIS

La energía solar fotovoltaica resulta esencial para satisfacer nuestra creciente demanda energética y luchar contra el cambio climático.

El efecto fotovoltaico se descubrió en 1839, pero hubo que esperar más de un siglo para obtener dispositivos capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica con eficiencias aceptables.

La carrera espacial y las crisis del petróleo de los años setenta impulsaron el desarrollo de las células solares, que hoy alcanzan eficiencias de conversión superiores al 25 por ciento.

Con diecinueve años y trabajando en el laboratorio de su padre, Becquerel generó electricidad al iluminar un electrodo de platino con luz de diferentes longitudes de onda, incluidas aquellas características de la luz solar. Para lograrlo, sumergió dos electrodos en un electrolito donde había diluido una pequeña cantidad de ácido nítrico y observó que, si iluminaba uno de los electrodos, se generaba una diferencia de potencial entre ellos. Su artículo es el primer documento en describir el efecto fotovoltaico (aunque no fuera en un sólido) del que se tiene constancia.

La literatura científica recoge otras experiencias relacionadas con este campo que se llevaron a cabo en la segunda mitad del siglo xix. En 1877, Wiliam Grylls Adams y Richard Evans Day utilizaron un dispositivo experimental consistente en un pequeño cilindro de selenio amorfo con contactos de platino en los extremos. El objetivo del experimento era comprobar si se inducía una corriente en el selenio al iluminar la muestra, como en efecto ocurrió. Su experiencia fue la primera demostración del fenómeno de la fotoconductividad (el aumento de la conductividad eléctrica de un material debido a la absorción de radiación electromagnética) en un sólido, aunque tuvieron que pasar varias décadas antes de que esos resultados tuvieran una explicación teórica satisfactoria.

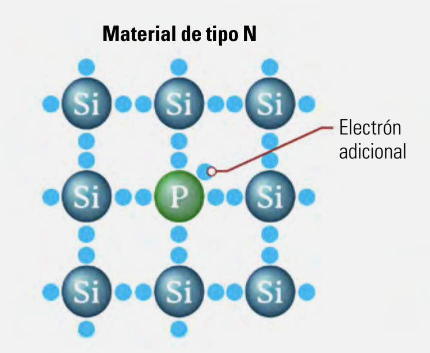
Dicha explicación llegaría a comienzos del siglo xx, gracias al advenimiento de la física cuántica y a los trabajos de Albert Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico, por los que obtuvo el premio Nobel de física de 1921. Ese efecto es conceptualmente muy similar al fotovoltaico: en ambos se produce una transferencia de energía de los fotones de la luz a los electrones, pero en el efecto fotoeléctrico estos últimos son expulsados

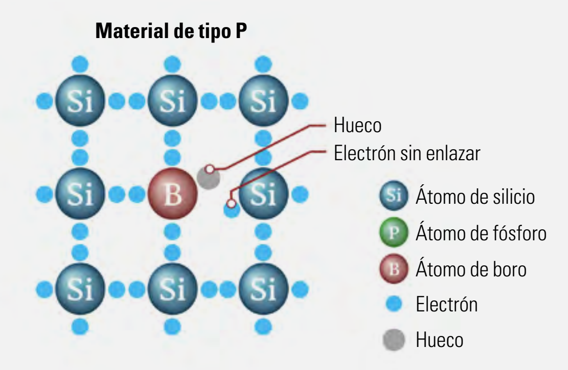
Cómo funciona una célula solar

Las células fotovoltaicas son dispositivos capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica. La mayoría de ellas están hechas de silicio, un material semiconductor clave en toda la electrónica moderna. Los átomos de silicio tienen cuatro electrones de valencia (de ocho posibles), por lo que se unen a otros cuatro átomos de silicio para formar una red.

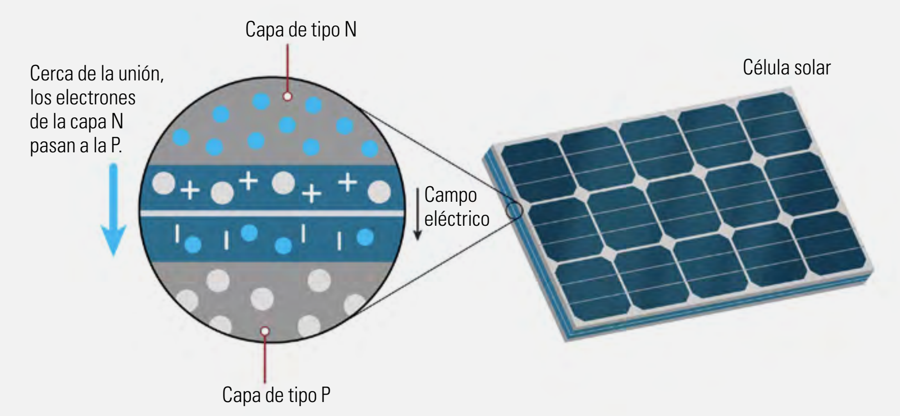
Una célula solar pone en contacto dos capas de silicio «dopadas» con impurezas, una de tipo N y otra de tipo P. En la primera de ellas, algunos átomos de silicio se sustituyen por otros (por ejemplo, de fósforo) que tienen un electrón de valencia más. Ese electrón no interviene en ningún enlace y puede moverse libremente.

En el material de tipo P, algunos de los átomos de silicio son reemplazados por otros que tienen un electrón de valencia menos. Así pues a esas impurezas les falta un electrón para formar enlaces con todos los átomos de silicio circundantes. Podemos identificar esos electrones que faltan con «huecos» positivos.

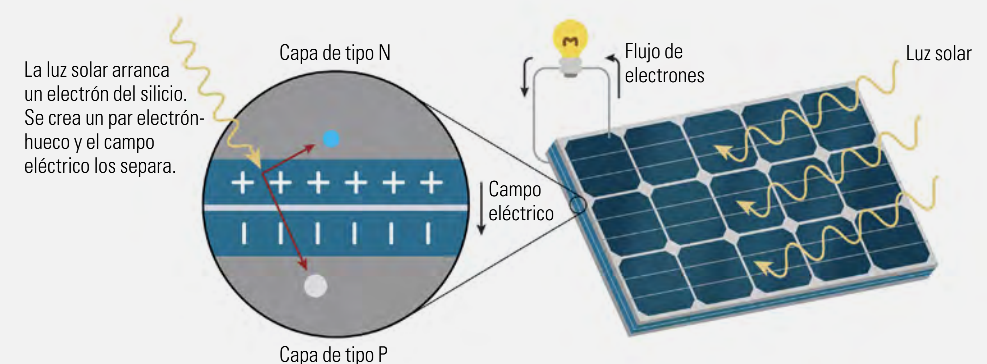




Cuando las dos capas entran en contacto, algunos electrones adicionales del material de tipo N se desplazan y llenan los huecos del material de tipo P. Esto ocurre solo cerca de la unión entre ambas capas. En esa zona, la capa de tipo N adquiere carga positiva (porque ha perdido electrones) y la capa de tipo P adquiere carga negativa (porque los ha ganado), lo cual crea un campo eléctrico que impide que sigan desplazándose más electrones de una capa a la otra.



Cuando la luz del sol incide sobre la célula, arranca electrones del silicio, generando pares electrón-hueco. Si esto sucede cerca de la unión, el campo eléctrico llevará los electrones a la capa de tipo N y los huecos a la capa de tipo P. Conectando ambas capas mediante un cable conductor, aparecerá una corriente de electrones que viajan de la capa de tipo N a la de tipo P a través del cable. De este modo, se logra generar electricidad a partir de la energía de la luz solar.



MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

del material, mientras que en el fotovoltaico permanencen en él, si bien pueden circular libremente al haber pasado de la banda de valencia a la de conducción.

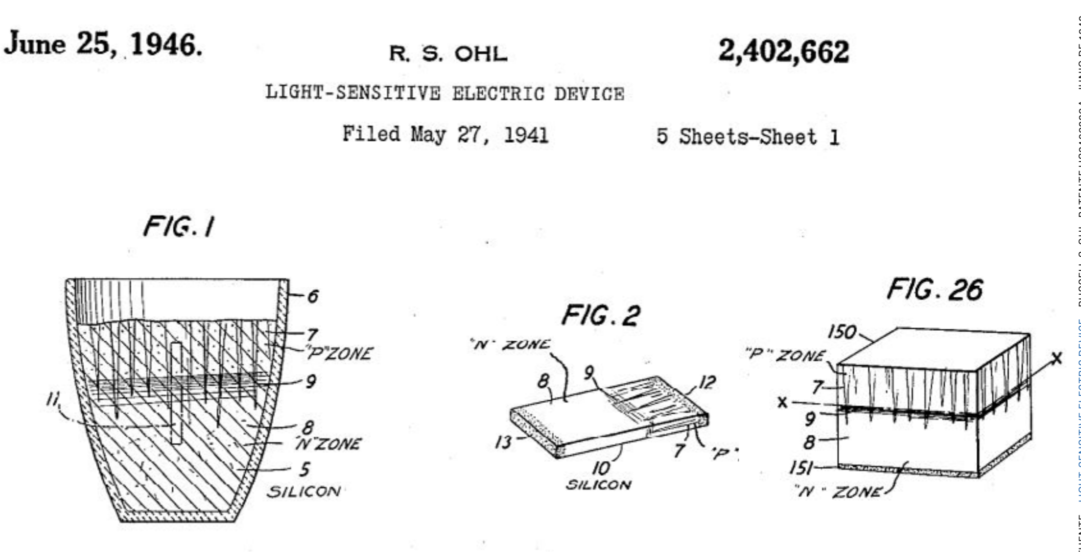
El siguiente avance relevante se produjo seis años después, en 1883, de nuevo con el selenio como material de estudio. Ese trabajo se lo debemos a Charles E. Fritts, a quien (de forma más que merecida) se considera el primer científico en fabricar una célula solar propiamente dicha. Fritts prensó una pasta de selenio fundido entre dos placas hechas de dos metales distintos. De esta forma, preparó una lámina delgada de selenio que quedó adherida a una de las placas de metal. A continuación, depositó sobre el selenio una capa de oro tan fina que era semitransparente a la radiación solar, y así fabricó el primer dispositivo fotovoltaico «de lámina delgada».

El aparato de Fritts tenía un área de 30 centímetros cuadrados y su eficiencia a la hora de convertir la energía solar en energía eléctrica era meramente testimonial, pues no llegaba al 1 por ciento. Su funcionamiento se basaba en las propiedades de la unión entre un metal y un semiconductor, lo que hoy día se conoce como una «barrera de Schottky», donde el metal era la fina capa de oro. El ingenio cumplía las dos condiciones imprescindibles para que se produjera el efecto fotovoltaico en un sólido: era un dispositivo asimétrico o rectificador de la corriente eléctrica (es decir, en el que la corriente podía fluir solo en un sentido) y permitía que la luz llegara a la unión, a través de la capa de oro semitransparente. Fritts fue también uno de los primeros científicos en percatarse del enorme potencial que tenían los dispositivos fotovoltaicos, y constató algunas de las grandes ventajas que conocemos hoy en día, como su bajo coste de fabricación y la posibilidad de transmitir la energía generada a otro punto o de almacenarla en baterías para su posterior utilización.

Ya entrada la década de 1930, se documentó el efecto fotovoltaico en diversos dispositivos basados en los materiales semiconductores habituales en aquellos años, como el selenio o el óxido cuproso (Cu_2O). Y en 1939, una célula solar construida con un material bastante «exótico» (sulfuro de talio, Tl_2S) por Foster C. Nix y Arnold W. Treptow, investigadores de los Laboratorios Telefónicos Bell, también mostró un efecto fotovoltaico apreciable.

Un accidente crucial

Simultáneamente al desarrollo de esas primeras células solares, el silicio recibía cada vez más atención, debido a su uso en los rectificadores empleados en los equipos de radio. Los estudios sobre los métodos de purificación del silicio (con objeto de fabricar detectores de ondas de radio fiables y con un comportamiento reproducible) posibilitaron una mejor comprensión de sus propiedades.



FUENTE: «LIGHT-SENSITIVE ELECTRIC DEVICE», RUSSELL S. OHL, PATENTE US2402662A, JUNIO DE 1946

Figuras clave de la primera patente de Russell S. Ohl, que muestran el lingote de silicio recién solidificado con la región de la fractura donde se formó la unión PN (*izquierda*), así como los dispositivos fotovoltaicos que obtuvo Ohl al cortar el lingote en perpendicular (*centro*) y en paralelo (*derecha*) a dicha unión.

En 1941, uno de esos trabajos iba a resultar determinante. Russell S. Ohl, científico experimental de los Laboratorios Bell, descubrió por casualidad la presencia de una barrera bien definida en una oblea de silicio fabricada a partir de silicio comercial de alta pureza (la mayor que se podía obtener en aquellos años, de alrededor del 99 por ciento). Ohl observó que una muestra con la que estaba trabajando presentaba una fractura y comprobó que, al iluminarla, fluía una corriente. Esa fractura, formada de manera accidental durante el proceso de obtención de la muestra, marcaba la frontera entre dos zonas, cada una de las cuales había adquirido impurezas de distintos tipos. Sin ser consciente de ello, Ohl había creado una unión PN, la base de cualquier célula solar.

Ohl detalló sus descubrimientos en dos patentes, incluso antes de comprender en profundidad el papel que desempeñaban las impurezas en las propiedades del silicio. Esas patentes contienen una descripción pormenorizada de lo que, en la actualidad, se considera la primera célula solar moderna basada en ese semiconductor, la cual presentaba una eficiencia de conversión del 1 por ciento.

La fractura permitió definir una unión «natural» en algunas piezas que Ohl extrajo del lingote. Los dispositivos resultantes mostraban una apreciable respuesta fotovoltaica y buenas propiedades rectificadoras. Al iluminarlos o calentarlos, uno de sus extremos desarrollaba un potencial negativo; al material que exhibía estas propiedades se le denominó silicio «negativo» o de tipo N, mientras que al material con el comportamiento opuesto se le llamó «positivo» o de tipo P. Esa identificación, que aún perdura en nuestros días, se debe al signo de la tensión que había que aplicar en los extremos del dispositivo para lograr que fluyera corriente a través de él: negativo en la zona de tipo N y positivo en la de tipo P. Más adelante, se demostró que el silicio «negativo» estaba contaminado con impurezas donadoras de electrones, y el silicio «positivo», con impurezas aceptoras.

Esa posibilidad de generar corriente y, sobre todo, tensión atrajo la atención del director de investigación de los Laboratorios Bell, Mervin Kelly, quien advirtió a Ohl y su equipo de que mantuvieran en secreto el hallazgo. Eso era algo frecuente en aquellos años, los primeros de la Segunda Guerra Mundial (aunque anteriores al ataque de Japón a Pearl Harbor). Una vez finalizado el conflicto, Ohl señaló que:

El Gobierno no había declarado la guerra, de modo que no podían clasificarlo como secreto, pero la empresa sí lo hizo. Así que trabajamos como si hubiera una guerra mucho antes, un año o dos antes, de que se declarara realmente.

Los sistemas que había descrito Ohl funcionaban de manera similar a los dispositivos de lámina delgada disponibles por entonces, pero es evidente que el método de preparación (del todo fortuito, como ya hemos visto) no facilitaba su fabricación comercial. Sin embargo, estaba claro que, en caso de encontrar un método adecuado para producir dispositivos de gran área, se podrían construir células solares comercialmente viables. Y, de hecho, los estudios pioneros de Ohl acabarían permitiendo desarrollar las primeras células solares comerciales de silicio. Así pues, podemos decir con toda justicia que cualquier dispositivo emisor o detector de radiación basado en una unión PN (por ejemplo, diodos emisores de luz , láseres semiconductores, fotodetectores o células solares) tiene sus raíces en el trabajo que llevó a cabo Ohl en la década de 1940.

La primera célula solar práctica

Con todo, el efecto fotovoltaico no pasó de ser una curiosidad científica durante la primera mitad del siglo XX. Hubo que esperar hasta 1954 para que se obtuviera la primera célula solar de silicio de gran área, fabricada por Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller y Gerald L. Pearson, que también trabajaban en los Laboratorios Bell. Esta célula tenía una eficiencia de conversión energética del 6 por ciento, muy superior a la de los dispositivos de Fritts y Ohl, lo que abrió las primeras perspectivas reales de obtener energía eléctrica mediante las células solares. Desde entonces el silicio, tanto mono- como multicristalino, se ha mantenido como el semiconductor por excelencia en las aplicaciones fotovoltaicas y sigue ejerciendo una fuerte hegemonía en el mercado de las células solares, en buena medida gracias a los avances de la industria microelectrónica basada en ese material.

Después de que los Laboratorios Bell presentaran el dispositivo de Chapin, Fuller y Pearson, el diario *The New York Times*, en su número del 26 de abril de 1954, publicó un artículo con el sugestivo título «La enorme energía del sol es aprovechada por una batería que emplea un ingrediente de la arena». En el segundo párrafo de ese texto, se incluía un comentario ciertamente

premonitorio con respecto a la invención de la célula solar:

[El nuevo dispositivo] puede marcar el comienzo de una nueva era, y acabar permitiendo la realización de uno de los sueños más anhelados por la humanidad: el aprovechamiento de la energía casi ilimitada del sol para los usos de la civilización.

En 1955, al año siguiente del anuncio de los Laboratorios Bell, algunas industrias impulsadas por el comienzo del programa espacial estadounidense recibieron el encargo de producir células solares para aplicaciones aeroespaciales. En particular, la empresa Hoffman Electronics fue la primera en comercializar tales dispositivos, aunque con una eficiencia de conversión muy baja, de tan solo el 3 por ciento. Ese mismo año, se probó en Americus (una localidad del estado de Georgia) el primer sistema telefónico rural alimentado por energía solar fotovoltaica, que empleaba transistores y células solares de los Laboratorios Bell.

Los resultados de ese primer sistema de comunicaciones autónomo mostraron que era viable usar un módulo fotovoltaico integrado por células solares e instalado en un poste telefónico para suministrar electricidad de manera fiable a los equipos telefónicos rurales. No obstante, esto no pasó de ser una «prueba de concepto», ya que el elevado coste de las células solares aconsejaba seguir utilizando las fuentes de energía tradicionales en este tipo de sistemas.

Las eficiencias de conversión no dejaron de aumentar desde el 6 por ciento del dispositivo de Chapin, Fuller y Pearson, por lo que pronto se llevaron a cabo estudios teóricos para tratar de establecer la máxima eficiencia que podían alcanzar las células solares. En un artículo de 1961, Wiliam B. Shockley y Hans J. Queisser demostraron que un material con propiedades similares a las del silicio podría llegar a una eficiencia de hasta el 30 por ciento. Sin embargo, dado que en aquellos años la fabricación de silicio de alta pureza todavía estaba en mantillas, pronto se hizo evidente que el entusiasmo inicial era prematuro. Aun así, las células solares resultaron adecuadas para su uso en satélites artificiales, una industria que empezaba a desarrollarse en aquellos años y que constituyó la principal aplicación de la energía fotovoltaica hasta principios de los años setenta.


LABORATORIOS BELL

Un operario instala un módulo fotovoltaico en un poste telefónico como fuente de energía del sistema autónomo de comunicaciones que se probó en 1955 en la población estadounidense de Americus.

Aplicaciones aeroespaciales

En 1958, Estados Unidos lanzó al espacio el satélite Vanguard 1, el cuarto de la historia que entró en órbita (tras el Sputnik 1 y el Sputnik 2 de la Unión Soviética y el Explorer 1 de EE.UU.) y el primero en usar células solares como fuente de energía. Este aparato del tamaño de un balón de fútbol, diseñado para comprobar las capacidades de un vehículo de lanzamiento y realizar diversas observaciones científicas, estuvo operativo durante más de seis años y es el objeto artificial más antiguo que aún gira alrededor de nuestro planeta.

A comienzos de los años sesenta, se pusieron en órbita los primeros satélites de un programa destinado a cubrir las comunicaciones entre Esta-





Las células fotovoltaicas encontraron sus primeras aplicaciones en la industria aeroespacial, suministrando energía a diversos satélites, como el pequeño Vanguard 1 (*izquierda*) o el Telstar II (*derecha*). Las células solares estaban distribuidas por toda la superficie de ambos satélites.

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN NAVAL DE EE.UU. (*Vanguard*); NASA/WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO (*Telstar*)

dos Unidos y Europa. Conocidos con el nombre de Telstar, también estaban alimentados por células solares. El primero de ellos, el Telstar 1, se lanzó en julio de 1962 y permitió la realización de llamadas telefónicas, así como la primera transmisión transatlántica de imágenes televisivas en directo. Construido por un equipo de los laboratorios Bell, era una esfera de 87,6 centímetros de diámetro y 77 kilogramos de peso, y supuso todo un hito para la época. Tanto ese satélite como el Telstar 2, que se lanzó en 1963, continúan en órbita alrededor de la Tierra, a pesar de estar inactivos.

En 1961, el presidente de Estados Unidos John Fitzgerald Kennedy anunciaba su compromiso de «llevar a un hombre a la Luna y devolverlo sano y salvo a la Tierra» antes del final de la década. Ese objetivo dio un nuevo empujón al desarrollo de las células solares, ya que tanto los satélites artificiales como los vehículos tripulados con los que se llegaría a nuestro satélite en 1969 necesitaban baterías de energía eléctrica autónomas, ligeras y fiables, y las células solares reunían todos estos requisitos. Aunque la electricidad obtenida con estas células resultaba carísima (el kilovatio hora costaba el equivalente a 100 euros actuales), ese coste seguía siendo muy bajo en comparación con el del resto de componentes de los vehículos espaciales.

El despegue definitivo

Las células solares recibieron un gran impulso gracias a la industria microelectrónica, de la que tomaron buena parte de sus procesos de fabricación. Merced a ello, en muy pocos años se obtuvieron dispositivos con eficiencias de conversión del 15 por ciento. El desarrollo en el ámbito espacial prosiguió durante los años sesenta y setenta. En 1973, la primera estación espacial estadounidense, Skylab, llevaba instalados paneles fotovoltaicos con una potencia total de 20 kilovatios. El año 1975 fue el primero en que las aplicaciones terrestres superaron a las espaciales, sobre todo debido al aumento de instalaciones para suministrar energía a faros marítimos y pequeñas plantas de producción experimentales.

La brusca subida de los precios del petróleo acaecida en la década de 1970 hizo que se disparara el interés por los dispositivos fotovoltaicos. La primera gran crisis se produjo en el otoño de 1973 cuando, a raíz de la guerra de Yom Kipur (que enfrentó a Israel con Egipto y Siria), la Organización de Países Exportadores de Petróleo decretó el embargo de las ventas de crudo a los países que habían apoyado a Israel, en especial a Estados Unidos. Dicho embargo se prolongó por espacio de seis meses y, al finalizar, en marzo de 1974, los precios nominales habían subido de 3

a 12 dólares por barril (de 18 a 72 dólares actuales). Pero lo peor estaba por venir: a comienzos de 1979, la revolución de Irán y el inicio de la guerra entre ese país e Irak provocaron nuevas alzas indiscriminadas en los precios, que pasaron de 13 a 34 dólares por barril (de 50 a 131 dólares actuales) entre 1979 y 1981.

Lo que vino después fue una evolución progresiva, en la que las células solares fueron madurando poco a poco, hasta alcanzar eficiencias de conversión superiores al 25 por ciento a principios de este siglo. Las aplicaciones de la energía solar no cambiaron demasiado respecto a las de las décadas precedentes: instalaciones en lugares de difícil acceso a la red eléctrica, objetos cotidianos como relojes y calculadoras de bolsillo y pequeños huertos solares de tipo experimental.

Esa situación cambió con el nuevo milenio, cuando el uso de energías renovables empezó a extenderse paulatinamente en todo el mundo y, en particular, en los países desarrollados. En naciones como Japón, Alemania, España, Italia, Estados Unidos o China se comenzó a incentivar el uso de esta fuente de energía mediante el pago de primas por la electricidad generada. Al mismo tiempo, la producción de paneles fotovoltaicos abandonó el ámbito de las compañías petrolíferas y la industria electrónica, y quedó en manos de fabricantes especializados, los cuales lideran el mercado desde la década de 2010.

Hoy en día, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una fuente más de energía eléctrica a gran escala, gracias a los grandes parques solares que proliferan por todo el planeta, cuya capacidad llega a superar los 500 millones de vatios (500 megavatios). Además, de acuerdo con los últimos informes de la Agencia Internacional de la Energía, la energía solar fotovoltaica es, junto a la eólica, la forma más barata de producir electricidad renovable. Por todo ello, está llamada a desempeñar un papel fundamental en el cambio de modelo energético que se avecina.

Ignacio Mártil de la Plaza es catedrático de electrónica en la Universidad Complutense de Madrid y miembro de la Real Sociedad Española de Física.

PARA SABER MÁS

Energía fotovoltaica: De la luz solar a la electricidad usando células solares. Martin Green, Acribia, 2002.

Let it shine: The 6,000-year story of solar energy. John Perlin. New World Library, 2013.

Energía solar: De la utopía a la esperanza. Ignacio Mártil de la Plaza. Guillermo Escolar, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Energía solar fotovoltaica. Luis Castañer en *IyC*, mayo de 1981

Células solares muy eficientes. Antonio Luque en *IyC*, junio de 1991.

El futuro de la energía solar. Bernd Müller en *IyC*, mayo de 2012.

Placas solares de perovskita. Varum Sivaram, Samuel D. Stranks y Henry J. Snaith en *IyC*, septiembre de 2015.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes, Cristales de aminoácidos, La genialidad de la siesta (ed.)* y *Comida sana para la humanidad y el planeta (ed.);* **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes;* **Ana Mozo:** *El cáncer de piel en el mundo;* **Pedro Pacheco:** *El triunfo de los mamíferos* y *Las hembras de las aves también cantan;* **Guillem Pérez Nadal:** *La búsqueda astronómica de materia oscura;* **Lorenzo Gallego:** *La genialidad de la siesta (trad.);* **Rosa Pujol:** *Construir el mundo de dentro afuera;* **Anna Romero:** *Comida sana para la humanidad y el planeta (trad.).*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665



NEUROCIENCIA

CONSTRUIR EL MUNDO DE DENTRO AFUERA

György Buzsáki | El cerebro sondea el entorno físico y selecciona solo la información necesaria para sobrevivir y prosperar

ISLENIA MILIEN

Cuando de joven impartía seminarios para estudiantes de medicina, enseñaba neurofisiología siguiendo de forma escrupulosa las normas establecidas. Explicaba con entusiasmo el modo en que el cerebro percibe el mundo y controla el cuerpo: los estímulos sensoriales procedentes de los ojos, los oídos y demás se convierten en señales eléctricas que se transmiten a las zonas específicas de la corteza sensorial encargadas de procesar esta información e inducir la percepción. Para iniciar un movimiento, los impulsos de la corteza motora ordenan a las neuronas de la médula espinal que produzcan contracciones musculares.

La mayoría de los estudiantes se conformaban con mis explicaciones, sacadas del libro de texto, acerca de los mecanismos cerebrales de recepción y emisión de señales. Pero una minoría —los perspicaces— siempre hacían más de una pregunta incómoda. «¿En qué lugar del cerebro tiene lugar la percepción?» «¿Qué inicia el movimiento de un dedo antes de que se activen las células de la corteza motora?» Siempre despachaba esas preguntas con una respuesta simple: «Todo esto sucede en la neocorteza». A continuación, cambiaba hábilmente de tema o añadía algunos términos en latín que mis estudiantes no entendían pero que parecían lo bastante científicos como para que mis explicaciones, revestidas de una pátina de autoridad, los satisficieran durante un tiempo.

Al igual que otros jóvenes investigadores, empecé mis estudios sobre el cerebro sin preocuparme mucho sobre si ese marco teórico de percepción-acción era cierto o falso. Durante muchos años tuve suficiente con mis propios progresos y con los espectaculares descubrimientos que gradualmente dieron lugar a lo que se denominó, en la década de 1960, el campo de la «neurociencia». Sin embargo, mi incapacidad para proporcionar respuestas satisfactorias a las legítimas preguntas de mis estudiantes me ha perseguido desde entonces. Tuve que lidiar con la dificultad de intentar explicar algo que en realidad no entendía.

A lo largo de los años, descubrí que esa frustración no me afectaba solo a mí. Muchos de mis colegas se sentían igual, tanto si lo admitían abiertamente como si no. Sin embargo, dicha frustación tuvo su parte positiva, ya que revitalizó mi carrera. Me impulsó, a lo largo de los años, a desarrollar una perspectiva que proporcionara una descripción alternativa de la forma en que el cerebro interacciona con el entorno.

El reto, para mí y para otros neurocientíficos, consiste en responder a la pregunta fundamental de qué es exactamente la mente. Desde tiempos de Aristóteles, los pensadores han supuesto que el alma, o la mente, es al principio un lienzo en blanco, una *tabula rasa*, donde se pintan las experiencias. Esta visión ha influenciado el pensamiento de las filosofías cristiana y persa, del empirismo británico y de la doctrina marxista. En el siglo pasado también impregnó la psicología y la ciencia cognitiva. La idea «de fuera adentro» representa la mente como una herramienta para aprender acerca de la verdadera naturaleza del mundo. La visión alternativa, la que ha definido mi investigación, sostiene que la principal preocupación de las redes cerebrales es mantener sus propias dinámicas internas y generar perpetuamente numerosas pautas de actividad neural sin sentido. Cuando una acción proporciona un beneficio para la supervivencia del organismo, la pauta de actividad neural que ha conducido a dicha acción adquiere significado. Cuando un bebé balbucea *o-o*, sus padres le ofrecen gozosamente el oso de peluche, por lo que el sonido *o-o* adquiere el significado de ese muñeco. Los recientes avances en neurociencia avalan esta idea.

EN SÍNTESIS

Según una antigua idea que ha perdurado hasta nuestros días, el cerebro es como un lienzo en blanco donde se inscribe la experiencia que adquirimos del mundo exterior.

Varios neurocientíficos la cuestionan y plantean, en cambio, que el cerebro aprende de dentro afuera, es decir, relaciona la propia actividad neuronal con la información que le llega del exterior.

Los experimentos están confirmando esa teoría al demostrar que los estímulos del entorno no cambian el modo en que se activan las redes de neuronas. En lugar de ello, los estímulos se emparejan con las trayectorias neuronales preexistentes en el cerebro, lo cual contribuye al aprendizaje.

¿El cerebro «representa» el mundo?

La neurociencia heredó la idea del lienzo en blanco milenios después de que los primeros pensadores dieran nombres como *tabula rasa* a las operaciones mentales. Aún hoy seguimos buscando mecanismos neurales que pudieran

estar relacionados con las ideas que ellos concibieron. El predominio del marco «de fuera adentro» está representado en los extraordinarios descubrimientos del legendario dúo científico formado por David Hubel y Torsten Wiesel, quienes introdujeron el registro de neuronas individuales para estudiar el sistema visual, y recibieron el premio Nobel de fisiología o medicina en 1981. En sus emblemáticos experimentos, registraron la actividad neural de animales a los que les mostraban imágenes de varias formas. Las líneas móviles, los bordes, las zonas claras u oscuras y otras características físicas provocaron la activación de distintos grupos de neuronas. Se conjeturó que la computación neuronal se inicia con patrones simples, que después se sintetizan en otros más complejos. Estas características se unen entonces en algún lugar del cerebro para representar un objeto. No se requiere participación activa; el cerebro lleva a cabo la acción de forma automática.

El marco de fuera adentro supone que la función fundamental del cerebro es percibir señales procedentes del mundo exterior e interpretarlas correctamente. Pero si esta suposición es cierta, se necesita una operación adicional para responder a tales señales. Encajonado entre las señales de entrada y salida, existe un procesador central hipotético que recibe las representaciones sensoriales del entorno y toma decisiones acerca de qué hacer con ellas para llevar a cabo la acción apropiada.

Pero ¿qué es exactamente el procesador central en este paradigma de fuera adentro? Este ente poco comprendido y conjetural recibe varios nombres: libre albedrío, homúnculo, ente decisorio, función ejecutiva, variables intervinientes o, simplemente, «caja negra». Todo depende de la inclinación filosófica del investigador, y de si la operación mental en cuestión se aplica al cerebro humano, al cerebro de otros animales o a modelos computacionales. Pero, en definitiva, todos estos conceptos hacen referencia a lo mismo.

Una implicación práctica del paradigma de fuera adentro es que la próxima frontera en el progreso de la neurociencia debería ser identificar la zona del cerebro donde reside el supuesto procesador central y profundizar en los mecanismos neuronales de la toma de decisiones. En efecto, la fisiología de la toma de decisiones se ha convertido en uno de los focos de atención más populares de la neurociencia contemporánea. Se ha propuesto que las regiones cerebrales más complejas, como la corteza prefrontal, son ese lugar donde se procesan todos los estímulos y de donde salen todas las señales de respuesta. No obstante, cuando se observa más de cerca, el marco de fuera adentro no se sostiene.

Dicho enfoque no puede explicar de qué forma los fotones que impactan sobre la retina se transforman en un recuerdo de una excursión veraniega. El modelo de fuera adentro requiere la supuesta intervención de un experimentador humano que observe el acontecimiento [*véase el recuadro de la página siguiente*]. Ese experimentador es necesario porque, aunque las neuronas cambien sus pautas de descarga cuando los receptores de los órganos sensoriales reciben estímulos (por ejemplo, de luz o de sonido), estos cambios no «representan» intrínsecamente nada que pueda ser captado e integrado por el cerebro. Las neuronas de la corteza visual que responden a la imagen de, pongamos por caso, una rosa, no saben lo que es. No «ven» el aspecto de una flor. Tan solo generan oscilaciones eléctricas en respuesta a señales procedentes de otras partes del cerebro, incluidas las que llegan a lo largo de múltiples vías complejas desde la retina.

En otras palabras, las neuronas de las áreas corticales sensoriales e incluso del hipotético procesador central no pueden «ver» lo que sucede en el mundo. No existe ningún intérprete en el cerebro que atribuya significado a estos cambios en las pautas de descarga de las neuronas. A falta de un homúnculo mágico que observe la actividad de todas las neuronas en el cerebro, y a falta del experimentador, las neuronas que asimilan todo esto desconocen los acontecimientos que han provocado los cambios en sus pautas de descarga. Las fluctuaciones en la actividad neuronal solo tienen sentido para el científico que se halla en la posición privilegiada de poder observar ambas cosas (los acontecimientos que tienen lugar en el cerebro y en el mundo externo) y después comparar las dos perspectivas.

La percepción es lo que hacemos

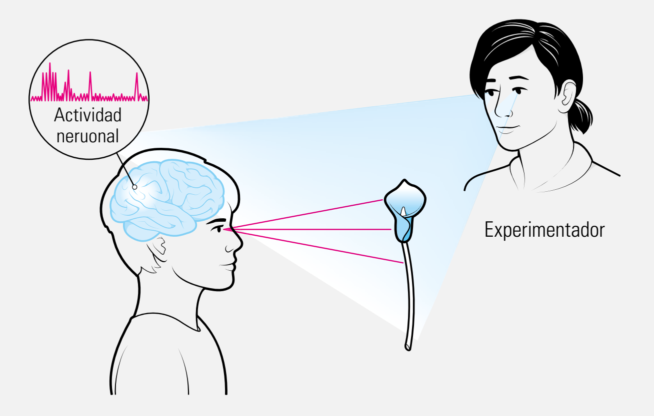
Dado que las neuronas no tienen acceso directo al mundo exterior, necesitan una forma de comparar o basar sus pautas de descarga en algo más. El término *basar* se refiere a la capacidad de los circuitos cerebrales de asignar significado a los cambios en la actividad de las neuronas provocados por los estímulos sensoriales. Para llevar a cabo dicha tarea, relacionan esta actividad con otra cosa. La señal de código Morse

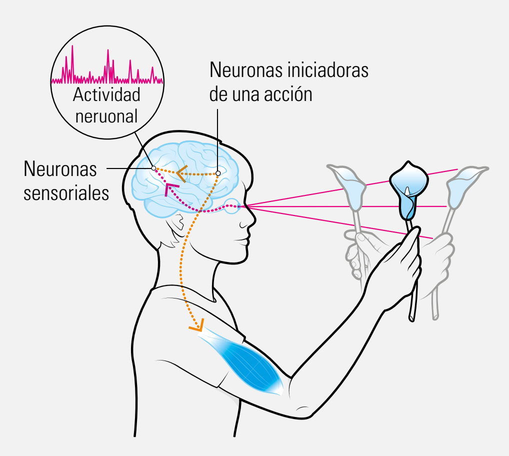
De fuera adentro y de dentro afuera

La idea del cerebro como un lienzo en blanco donde se inscribe la experiencia ha existido desde la antigüedad (aún persiste hoy en día, con algunos cambios). Varios neurocientíficos han empezado a cuestionar esta teoría, porque requiere una suposición difícil de explicar sobre el modo en que percibimos y procesamos acontecimientos procedentes del mundo exterior: la necesidad de que un intérprete hipotético nos cuente lo que está sucediendo.

Modelo de fuera adentro

Un estímulo, como la imagen de una flor, llega a los ojos y el cerebro responde mediante la activación de las neuronas. Esta teoría solo es plausible si existe un experimentador que observe y establezca una relación entre la flor y las respuestas neuronales inducidas por esta. Sin el experimentador, las neuronas en la corteza sensorial no «ven» la flor.





Modelo de dentro afuera

La teoría alternativa, de dentro afuera, elimina la necesidad del experimentador. En su lugar, supone que alcanzamos a comprender el mundo exterior a través de acciones, como mover una flor, para aprender acerca de un objeto. Para lograrlo, las señales de las neuronas que inician la acción se combinan con las señales sensoriales para facilitar la comprensión del tamaño, la forma y otros atributos del objeto. Se genera una imagen con sentido, lo que permite a las neuronas «ver» la flor.

BROWN BIRD DESIGN

dah-dah-dit solo adquiere significado cuando se la ha vinculado antes con la letra *g*. En el cerebro, la única fuente posible de segunda opinión aparece cuando iniciamos una acción.

Aprendemos que los palos que nos parecen torcidos en el agua en realidad no lo están cuando los movemos. De forma similar, la distancia entre dos árboles y dos picos de montaña puede parecer idéntica, pero al movernos y cambiar nuestra perspectiva nos damos cuenta de la diferencia.

El marco de fuera adentro sigue una cadena de acontecimientos que van de la percepción a la decisión y la acción. Según este modelo, las neuronas correspondientes a las áreas sensoriales se rigen por las señales ambientales y, por lo tanto, no pueden relacionar su actividad con otra cosa. Pero el cerebro no es una unidad de procesamiento en serie; no sigue estos pasos uno detrás de otro. En lugar de ello, cuando una persona emprende una acción, las áreas motoras del cerebro envían información al resto de la corteza cerebral sobre la acción iniciada. El mensaje enviado se denomina descarga corolaria.

Los circuitos neuronales que inician una acción se dedican a dos tareas. La primera es enviar una orden a los músculos que controlan los ojos y otros sensores corporales (los dedos y la lengua, entre otros). Estos circuitos orientan a los sensores corporales en la dirección óptima para investigar en profundidad el origen de un estímulo. También aumentan la capacidad del cerebro para identificar la naturaleza y la localización de estímulos inicialmente ambiguos procedentes de los sensores.

La segunda tarea de los circuitos de acción consiste en enviar notificaciones (las descargas corolarias) a las áreas sensoriales y más complejas del cerebro. Puede pensarse en ellas como recibos de correo certificado. Las neuronas que inician el movimiento ocular también notifican a las áreas sensoriales visuales de la corteza lo que está sucediendo, y desambiguan, por ejemplo, si una flor se está meciendo con el viento o la está moviendo la persona que la observa.

Este mensaje corolario proporciona la segunda opinión que los circuitos sensoriales necesi-

tan para establecer una base, una confirmación de que «nuestra propia acción es el agente del cambio». Se envían mensajes corolarios parecidos al resto del cerebro cuando una persona lleva a cabo acciones para investigar la flor y su relación con uno mismo y con otros objetos. Sin dicha exploración, los estímulos procedentes exclusivamente de la flor (los fotones que llegan a la retina conectada a un cerebro inexperto) nunca se convertirían en señales que proporcionaran una descripción significativa del tamaño y la forma de la flor. La percepción puede definirse entonces como lo que *hacemos*, no lo que captamos pasivamente a través de nuestros sentidos.

Usted mismo puede llevar a cabo una demostración de una versión sencilla del mecanismo de descargas corolarias. Cúbrase uno de los ojos con una mano y muévase el otro ojo suavemente desde el lateral, con la punta del dedo, cerca de tres veces por segundo mientras lee este texto. Inmediatamente verá que el texto se desplaza de un lado al otro. Por comparación, al leer o al mirar a su alrededor en la estancia, no parece que nada se mueva. Tal constancia tiene lugar porque las neuronas que inician los movimientos oculares para examinar las frases también envían una señal corolaria al sistema visual, para indicar si el movimiento procede del mundo o del globo ocular, lo que estabiliza la percepción del entorno.

Aprender mediante el emparejamiento

El contraste entre los enfoques de fuera adentro y de dentro afuera resulta más llamativo cuando se utiliza para explicar los mecanismos del aprendizaje. Una suposición tácita del modelo del lienzo en blanco es que la complejidad del cerebro aumenta con el número de experiencias. A medida que aprendemos, las interacciones de los circuitos cerebrales deberían de resultar cada vez más elaboradas. En cambio, en el marco de dentro afuera la experiencia no es la fuente principal de la complejidad del cerebro.

En su lugar, el cerebro se organiza en un amplio repertorio de pautas prestablecidas de descargas, conocidas como trayectorias neuronales. Este modelo de cerebro autorganizado puede compararse con un diccionario que contuviera inicialmente palabras sin sentido. Las nuevas experiencias no cambian la forma en que funcionan esas redes (su nivel de actividad global, por ejemplo). En vez de ello, el aprendizaje tiene lugar a través del emparejamiento de trayectorias neuronales preexistentes con acontecimientos que se producen en el mundo.

Para comprender el proceso de emparejamiento, debemos examinar las ventajas y las limitaciones que la dinámica cerebral impone a la experiencia. En su versión más simple, los modelos de redes neuronales del lienzo en blanco suponen la existencia de una serie de neuronas muy similares, conectadas al azar. Se presupone que los circuitos cerebrales son muy plásticos y que cualquier estímulo arbitrario puede alterar su actividad. Puede verse la falacia de este enfoque al considerar un ejemplo del campo de la inteligencia artificial. La investigación clásica en IA (en especial, la rama conocida como conexionismo, la base de las redes neurales artificiales) se adhiere al modelo de tabula rasa, de fuera adentro. Quien más promovió esta visión predominante fue probablemente Alan Turing, el gran pionero de la modelización de la mente, en el siglo xx. «Presumiblemente, el cerebro del niño es algo así como una libreta recién comprada en la papelería», escribió.

Las redes neurales artificiales construidas para que «escriban» la información entrante en un circuito neural suelen fracasar porque cada nueva información modifica inevitablemente las conexiones y la dinámica del circuito. Se dice que el circuito tiene plasticidad. Pero existe un inconveniente. Al ir ajustando sin cesar las conexiones en sus redes mientras aprende, el sistema de IA, en un momento impredecible, puede borrar todos los recuerdos almacenados. Es un error conocido como interferencia catastrófica, algo que no sucede nunca en un cerebro real.

El modelo de dentro afuera, por el contrario, sugiere que las redes cerebrales autorganizadas resisten tales perturbaciones. Y, aun así, también muestran una plasticidad selectiva, cuando es necesario. La forma en que el cerebro logra este equilibrio tiene que ver con las inmensas diferencias en la fuerza de conexión de los múltiples grupos de neuronas. La mayoría de las neuronas solo están débilmente conectadas con otras, mientras que un subconjunto más pequeño conserva vínculos robustos. La minoría fuertemente conectada está siempre alerta. Se activa con rapidez, comparte la información en el contexto de su propio grupo y resiste con firmeza cualquier modificación en los circuitos neuronales. Dadas la multitud de conexiones y sus altas velocidades de comunicación, estas subredes de élite, que a veces se describen como el «club de los ricos», permanecen bien

informadas acerca de los acontecimientos neuronales que suceden en todo el cerebro.

El club de los ricos representa aproximadamente el 20 por ciento de la población total de neuronas, pero se encarga de casi la mitad de la actividad cerebral. Por el contrario, el «club de los pobres» está formado por la mayoría de las neuronas, las cuales tienden a generar impulsos lentos y presentan una conexión débil con otras. Pero también son muy plásticas y capaces de modificar físicamente las sinapsis (los puntos de conexión entre neuronas).

Tanto el club de los ricos como el de los pobres son importantes para mantener la dinámica cerebral. Los miembros del primero, siempre a punto, se activan de forma similar en respuesta a experiencias diversas. Ofrecen soluciones rápidas y aceptables en la mayoría de las circunstancias. Podemos hacer buenas suposiciones sobre lo desconocido no porque lo recordemos, sino porque nuestro cerebro siempre hace conjeturas sobre un acontecimiento nuevo. Nada es del todo nuevo para el cerebro, porque siempre relaciona lo nuevo con lo antiguo. Generaliza. Incluso un cerebro inexperto posee una inmensa reserva de trayectorias neuronales disponibles, lo que ofrece oportunidades de emparejar acontecimientos del mundo con trayectorias preexistentes sin necesidad de una reconfiguración sustancial de las conexiones. Un cerebro que se rehiciera a sí mismo constantemente sería incapaz de adaptarse con rapidez a los acontecimientos cambiantes del mundo exterior.

Pero las neuronas plásticas que se activan con lentitud también desempeñan una función esencial. Entran en acción cuando se detecta algo de importancia para el organismo, algo que debe almacenarse para consultas futuras. Entonces proceden a movilizar su inmensa reserva para registrar sutiles diferencias entre una cosa y otra cambiando la fuerza de algunas conexiones neuronales. Los niños aprenden el significado de la palabra *perro* después de ver distintos tipos de canes. Cuando un niño ve una oveja por primera vez, quizá la llame *perro*. Solo aprenderá a diferenciarlos cuando esta distinción (comprender la diferencia entre una mascota y un animal de granja) cobre sentido.

La cognición como acción internalizada

Como investigador, no me había propuesto construir una teoría que se opusiera al marco de fuera adentro. No fue hasta décadas después de haber empezado mis estudios sobre la autorganización de los circuitos cerebrales y las descargas rítmicas de las poblaciones neuronales en el hipocampo cuando me di cuenta de que el cerebro está más ocupado consigo mismo que con lo que sucede a su alrededor. Descubrir este hecho me llevó a establecer un programa de investigación nuevo para mi laboratorio. Nuestros experimentos, junto con los resultados obtenidos por otros grupos, revelaron que las neuronas dedican la mayor parte de su actividad a sustentar los estados internos del cerebro, que están en perpetuo cambio, en lugar de verse controladas por los estímulos que inciden en nuestros sentidos.

En el transcurso de la selección natural, los organismos se adaptan a los nichos ecológicos donde viven y aprenden a predecir los resultados probables de sus acciones en tales nichos. A medida que la complejidad cerebral aumenta, entre los circuitos neuronales de salida (acciones motoras) y los de entrada (estímulos sensoriales) van insertándose conexiones y computaciones neuronales más intrincadas. Estas inserciones permiten la predicción de acciones planificadas en entornos más complejos y cambiantes, así como en un futuro lejano. Los cerebros más sofisticados también se organizan para permitir que las computaciones continúen cuando los estímulos sensoriales desaparecen temporalmente y las acciones de un animal se detienen. Cuando una persona cierra los ojos, sigue sabiendo dónde está, porque una gran parte de lo que define esa «visión» está arraigada en la propia actividad cerebral. Este modo desvinculado de actividad neuronal proporciona acceso a un mundo virtual internalizado de experiencia indirecta o imaginada, y sirve como puerta de acceso a distintos procesos cognitivos.

El modo desvinculado en que opera el cerebro lo ha demostrado nuestro trabajo sobre el lóbulo temporal. Se trata de un área que incluye el hipocampo, la corteza entorrinal adyacente y estructuras relacionadas implicadas en múltiples aspectos del desplazamiento (el seguimiento de la dirección, la velocidad, la distancia recorrida, los límites ambientales, etcétera).

Nuestra investigación se basa en teorías destacadas acerca de las funciones del sistema del hipocampo, como el espectacular descubrimiento de John O'Keefe, del Colegio Universitario de Londres, que le valió el premio Nobel. O'Keefe

descubrió que los impulsos de las neuronas del hipocampo de un animal cuando se desplaza coinciden con la localización espacial de dicho animal. Por esta razón, estas neuronas se denominan neuronas de ubicación.

Cuando una rata camina a través de un laberinto, se activan conjuntos específicos de neuronas de ubicación en una cadena secuencial que corresponde al punto del trayecto donde se encuentra el animal. A partir de esta observación, puede concluirse provisionalmente que los estímulos sensoriales procedentes del entorno, que están en continuo cambio, ejercen un control sobre los impulsos de las neuronas, lo que está en consonancia con el modelo de fuera adentro.

Pero otros experimentos, algunos realizados en seres humanos, muestran que estas mismas redes se utilizan para nuestro mundo interno: registran los recuerdos personales, participan en la planificación e imaginan acciones futuras. Si se enfoca la cognición desde una perspectiva de dentro afuera, se hace patente que los desplazamientos que se realizan por un espacio físico y por un paisaje imaginado son procesados mediante mecanismos neurales idénticos.

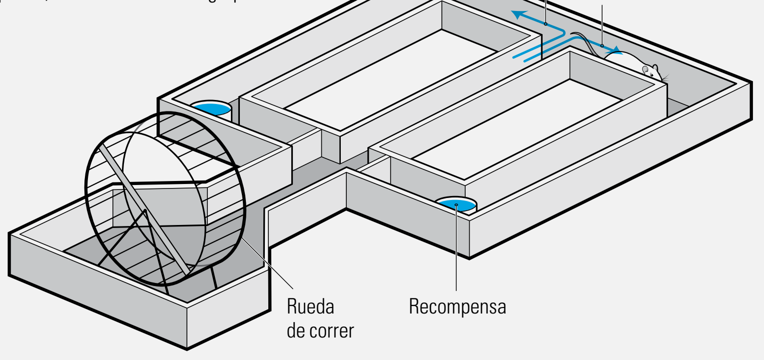
Hace quince años, mi laboratorio comenzó a explorar los mecanismos de orientación y memoria espacial en el hipocampo, para contrastar los modelos de fuera adentro y de dentro afuera. En 2008, junto con la investigadora posdoctoral Eva Pastalkova, entrenamos a ratas para que alternaran entre las ramas izquierda y derecha de un laberinto en busca de agua. Antes de iniciar la marcha a través del laberinto, la rata debía correr en una rueda durante 15 segundos; así se garantizaba que eran solo los recuerdos de las rutas por el laberinto, y no las señales del entorno y las derivadas del cuerpo, los que le permitía escoger una rama particular

Imaginarse el camino

Un experimento demuestra que, cuando una rata está planificando si tomar la ruta izquierda o la derecha para recibir una recompensa, se activan distintos grupos de neuronas, cada uno en un orden distinto.

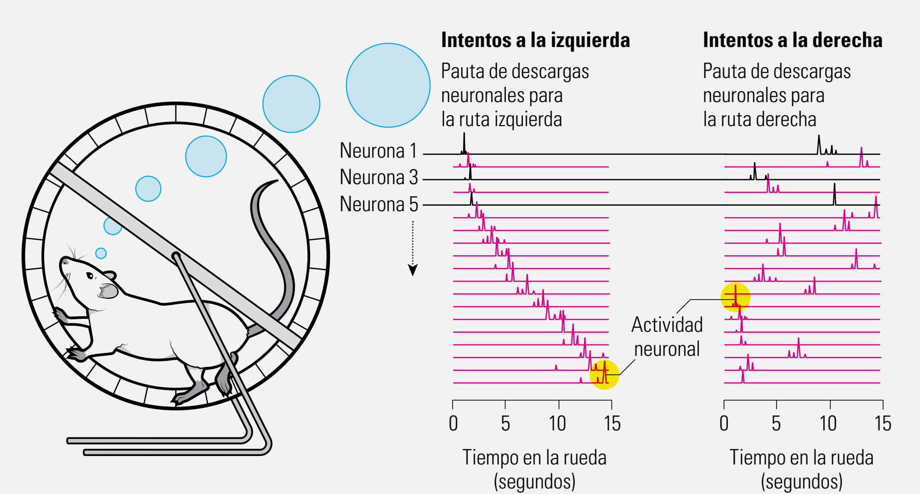
Diseño experimental

Una rueda de correr se sitúa a la entrada de un laberinto con dos opciones de ruta, donde ambas conducen a una recompensa. La rata puede escoger un camino a través del laberinto después de correr en la rueda durante 15 segundos. Se registran las pautas de los impulsos nerviosos durante la actividad en el laberinto y en la rueda.



Resultados

La actividad neuronal mientras la rata corría en la rueda predijo la dirección que tomaría después en el laberinto, como si estuviera imaginando el camino que vendría a continuación. El diagrama «Intentos a la izquierda» representa una secuencia de descargas neuronales distinta de la del diagrama de intentos a la derecha. Cuando se daba la pauta «izquierda» mientras la rata estaba en la rueda, momentos después tomaba la ruta izquierda en el laberinto.



BROWN BIRD DESIGN

del laberinto. Según nuestro razonamiento, si las neuronas del hipocampo «representaran» lugares en los pasillos del laberinto y en la rueda, según lo predicho por la teoría de O'Keefe, en cada punto deberían activarse continuamente unas cuantas neuronas, tanto si la rata se encontraba en los pasillos como si estaba en la rueda. Por el contrario, si las descargas neuronales eran generadas por mecanismos cerebrales internos que sustentasen a la vez la orientación y la memoria espacial, la duración de la activación neuronal debería ser similar en todas las localizaciones, incluso en el interior de la rueda.

Los resultados obtenidos en estos experimentos pusieron en entredicho el modelo de fuera adentro. De entre los cientos de neuronas cuya actividad se registró, ni una sola estuvo emitiendo continuamente impulsos durante la carrera en la rueda. Por el contrario, muchas neuronas se activaron de forma transitoria una detrás de otra, en una secuencia continua.

Obviamente, estas neuronas no podían denominarse de ubicación, porque el cuerpo del animal no se desplazaba mientras permanecía en un único lugar, la rueda de correr. Además, las pautas de descarga de las neuronas en dicha trayectoria neuronal no se distinguían de las pautas de las neuronas que se activaban mientras la rata cruzaba las ramas del laberinto.

Cuando separamos los experimentos en función de si la rata escogería después la rama izquierda o la derecha, las trayectorias neuronales fueron diferentes de una forma única. Esa clara distinción descartó la posibilidad de que estas secuencias neuronales aparecieran como resultado de contar pasos, de estimar el esfuerzo muscular o de algún otro estímulo de retroalimentación no detectado procedente del cuerpo. Además, las trayectorias neuronales únicas nos permitieron predecir qué rama del laberinto escogería el animal desde el momento en que entraba en la rueda y mientras corría en ella, un período en el que la rata debía tener en mente la rama recorrida previamente. Los animales debían alternar cada vez de rama para obtener su recompensa [*véase el recuadro de la página anterior*].

Estos experimentos nos hicieron pensar que los algoritmos neuronales que podemos usar para ir andando al supermercado rigen el desplazamiento mental internalizado. La orientación en el espacio desvinculada nos lleva a través de una serie de acontecimientos que generan los recuerdos personales, conocidos como memoria episódica.

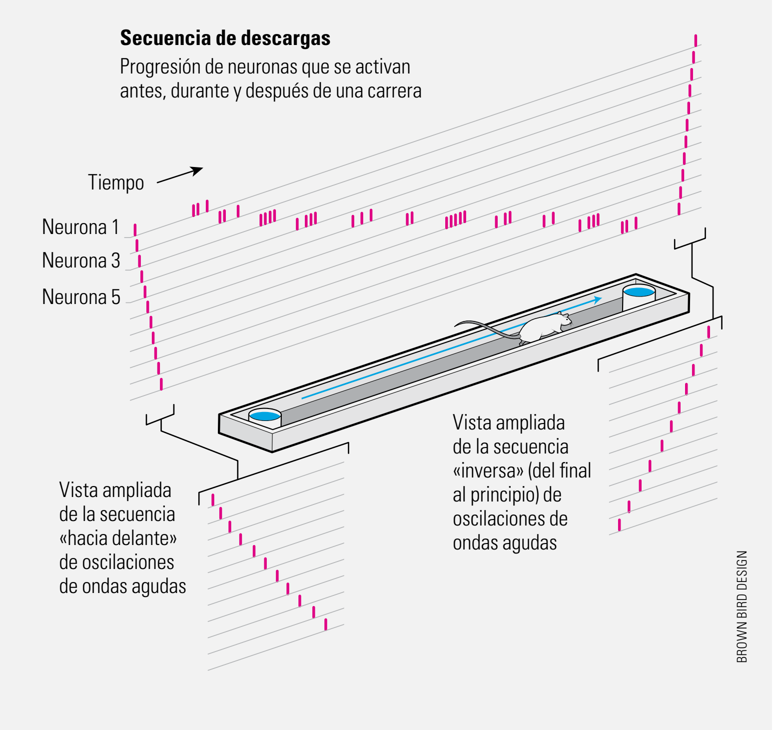
En realidad, la memoria episódica es más que una recopilación de acontecimientos pasados. También nos permite mirar hacia adelante para planificar el futuro. Funciona como una especie de motor de búsqueda que nos ayuda a indagar tanto en el pasado como en el futuro. Ese conocimiento presagia asimismo una expansión de la nomenclatura. Los experimentos muestran que las secuencias de actividad de las neuronas de ubicación se generan internamente como secuencias preconfiguradas seleccionadas para cada pasillo del laberinto. Se basan en los mismos mecanismos, pero reciben múltiples designaciones: se las puede llamar neuronas de ubicación, neuronas de memoria o neuronas de planificación, en función de la circunstancia.

Otras pruebas a favor de la importancia de las operaciones de circuito desvinculadas proceden de la actividad del cerebro «en pausa», como cuando un animal deambula sin hacer nada, consume una recompensa o simplemente duerme. Cuando una rata descansa en su jaula después de haber explorado el laberinto, su hipocampo genera trayectorias neuronales breves y autorganizadas. Estas oscilaciones de ondas agudas, como se denominan, tienen lugar en ventanas de tiempo de 100 milisegundos y reactivan las mismas neuronas que estaban activas durante los varios segundos de carrera por el laberinto, recapitulando las secuencias neuronales que tuvieron lugar durante los recorridos a través de él. Las secuencias de oscilaciones de ondas agudas contribuyen a la formación de los recuerdos a largo plazo y son esenciales para un funcionamiento cerebral normal. De hecho, la alteración de las oscilaciones de ondas agudas, sea mediante manipulación experimental o a causa de una enfermedad, provoca graves disfunciones en la memoria [*véase el recuadro de la página siguiente*].

Los ingeniosos experimentos llevados a cabo en seres humanos y en animales a lo largo de la última década muestran que las oscilaciones comprimidas en el tiempo constituyen un proceso internalizado de prueba y error mediante el que subconscientemente se crean alternativas (reales o ficticias) para tomar decisiones acerca de la estrategia óptima que seguir. En ese proceso se construyen nuevas inferencias y se planifican acciones futuras sin tener que ponerlas a prueba de inmediato mediante una acción

Ensayo y repetición

Un grupo de neuronas se activa antes, durante y después de que una rata corra, ida y vuelta, por una pista elevada. Las neuronas que se activan deprisa al principio y al final de la carrera (*vistas ampliadas*) son las mismas que están activas durante esta, y constituyen o bien un ensayo o bien una repetición (en este último caso en el orden inverso) de la trayectoria de la rata. Estos acontecimientos precoces y tardíos se conocen como oscilaciones de ondas agudas y hacen posible un proceso mental que selecciona y recuerda un camino óptimo.



real. En este sentido, nuestros pensamientos y planes son acciones diferidas, y la actividad cerebral desvinculada es una operación cerebral activa y esencial. Por el contrario, la teoría de fuera adentro no hace ningún intento de asignar un rol al cerebro desvinculado cuando está descansando, o incluso cuando se encuentra en pleno sueño.

Relevancia del modelo de dentro afuera

Además de sus implicaciones teóricas, el enfoque de dentro afuera tiene varias aplicaciones prácticas. Puede ayudar en la búsqueda de mejores herramientas diagnósticas para las enfermedades del cerebro, ya que la terminología actual suele fracasar al intentar describir con precisión los mecanismos biológicos subyacentes a las enfermedades mentales y neurológicas. Los psiquiatras son conscientes del problema, pero se ven entorpecidos por la limitada comprensión de los mecanismos patológicos y su relación con los síntomas y las respuestas a los fármacos.

La teoría de dentro afuera también debería considerarse como una alternativa a algunos de los modelos conexionistas predominantes para llevar a cabo investigación en IA. Estos podrían sustituirse por modelos que mantuvieran su propia actividad autorganizada y que aprendieran mediante «emparejamiento», en lugar de hacerlo a través de ajustes continuos en su sistema de circuitos. Las máquinas construidas de esta forma podrían desvincular sus operaciones de las señales procedentes de los sensores electrónicos y crear innovadoras formas de computación que se parecieran a los procesos cognitivos internos.

En el cerebro real, los procesos neurales que operan mediante la desvinculación de los sentidos van de la mano con los mecanismos que promueven la interacción con el mundo que los rodea. Todos los cerebros, simples o complejos, usan los mismos principios básicos. La actividad neural desvinculada, calibrada simultáneamente por la experiencia exterior, es la esencia de la cognición. Ojalá hubiera tenido este conocimiento cuando mis estudiantes de medicina más brillantes hacían sus legítimas preguntas que me quité de encima con presteza.

György Buzsáki, neurocientífico de sistemas, estudia la sintaxis neuronal en la Universidad de Nueva York. Fue uno de los ganadores del *Brain Prize* de la Fundación Lundbeck en 2011. Su último libro se titula *The brain from inside out* (Oxford University Press, 2019).



EN NUESTRO ARCHIVO

Mecanismos cerebrales de la visión. David H. Hubel y Torsten N. Wiesel en *IyC*, noviembre de 1979.
El GPS del cerebro. May-Britt Moser y Edvard I. Moser en *IyC*, marzo de 2016.
De las redes neuronales a la mente. Danielle S. Bassett y Max Bertolero en *IyC*, septiembre de 2019.
La construcción cerebral de la realidad. Anil K. Seth en *IyC*, noviembre de 2019.

SALUD PÚBLICA

COMIDA SANA PARA LA HUMANIDAD Y EL PLANETA

Gayathri Vaidyanathan | La alimentación ideal debería ser nutritiva y no poner en riesgo los recursos naturales. En estos momentos se intenta dilucidar cuál sería la mejor dieta en países como Kenia o Suecia



STANOD/ISTOCK

La costa cercana a Kilifi, al norte de Mombasa, está salpicada de aldeas pesqueras. Las aguas dan allí cobijo a peces loro, pulpos y otras especies comestibles. La paradoja es que los niños de esos lugares rara vez comen los frutos del mar: el plato básico es el ugali (harina de maíz mezclada con agua) y la mayor parte de su alimentación es de origen vegetal. Casi la mitad de la población infantil presenta un retraso en el crecimiento, el doble de la tasa nacional de Kenia.

Lora Iannotti, investigadora de salud pública en la Universidad de Washington en San Luis, y sus colegas kenianos preguntaron en 2020 a los aldeanos por qué no ofrecían a sus hijos los productos de la pesca, pese a que todos vivían de ella. (Los estudios demuestran que el pescado y otros alimentos de procedencia animal mejoran el crecimiento.) Las familias contestaron que les traía más cuenta vender la captura que comérsela.

Así que Iannotti y su equipo están llevando a cabo un experimento controlado. Facilitan a los pescadores trampas modificadas dotadas de pequeñas aberturas por donde pueden escapar los peces inmaduros. Esta medida debería ir mejorando el desove y la salud de un océano y unos arrecifes castigados por la sobrepesca y, en última instancia, aumentar los ingresos, sostiene Iannotti. Además, con la mitad de las familias, el personal sanitario local está realizando visitas a domicilio, demostraciones culinarias y una campaña de envío de mensajes para promover el pescado como alimento infantil, en particular especies autóctonas abundantes y de crecimiento rápido, como el «tafi», o sigano pintado (*Siganus canaliculatus*), y el pulpo. Los científicos llevarán a cabo un seguimiento para averiguar si esos niños se alimentan mejor y crecen más que los de otras familias que no reciben los mensajes.

El objetivo del experimento, aclara Iannotti, es dilucidar «qué productos del mar podemos escoger que sean saludables tanto para los ecosistemas como para las personas». La dieta propuesta también debe ser asequible y aceptable desde el punto de vista cultural, añade.

Iannotti está lidiando con preguntas situadas en el punto de mira de los investigadores, las Naciones Unidas, los financiadores internacionales y muchos países que pretenden hallar dietas que sean buenas tanto para el ser humano como para el planeta. Más de 2000 millones de personas presentan sobrepeso u obesidad, la mayoría en el mundo occidental. Al mismo tiempo, 811 millones no ingieren las calorías suficientes o tienen carencias nutricionales, sobre todo en los países con rentas bajas o medias. La alimentación malsana provocó más muertes en el mundo durante 2017 que ninguna otra causa, incluido el tabaquismo. Habida cuenta del crecimiento incesante de la población y del gran número de personas que adoptan la dieta occidental, la producción de carne, productos lácteos y huevos deberá aumentar en un 44 por ciento para 2050, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Ello plantea un problema ambiental que se suma a las preocupaciones sanitarias. El sistema alimentario industrial ya es responsable de una cuarta parte de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. También demanda el 70 por ciento del agua dulce que utilizamos y el 40 por ciento del suelo, amén de depender de fertilizantes que alteran el ciclo del nitrógeno y del fósforo, los cuales causan gran parte de la contaminación de los ríos y del litoral.

Un consorcio de 37 nutricionistas, ecólogos y otros expertos de 16 países, la llamada Comisión EAT-*Lancet* sobre Alimentos, Planeta y Salud, publicó en 2019 un informe que abogaba por un cambio sustancial en la alimentación, que contemplara tanto la nutrición como el ambiente. Un adepto a la dieta de referencia EAT-*Lancet* sería «flexitariano»: la mayoría de los días comería vegetales y, de vez en cuando, pequeñas cantidades de carne o pescado.

El informe generó una gran atención en torno a la alimentación sostenible y también algunas

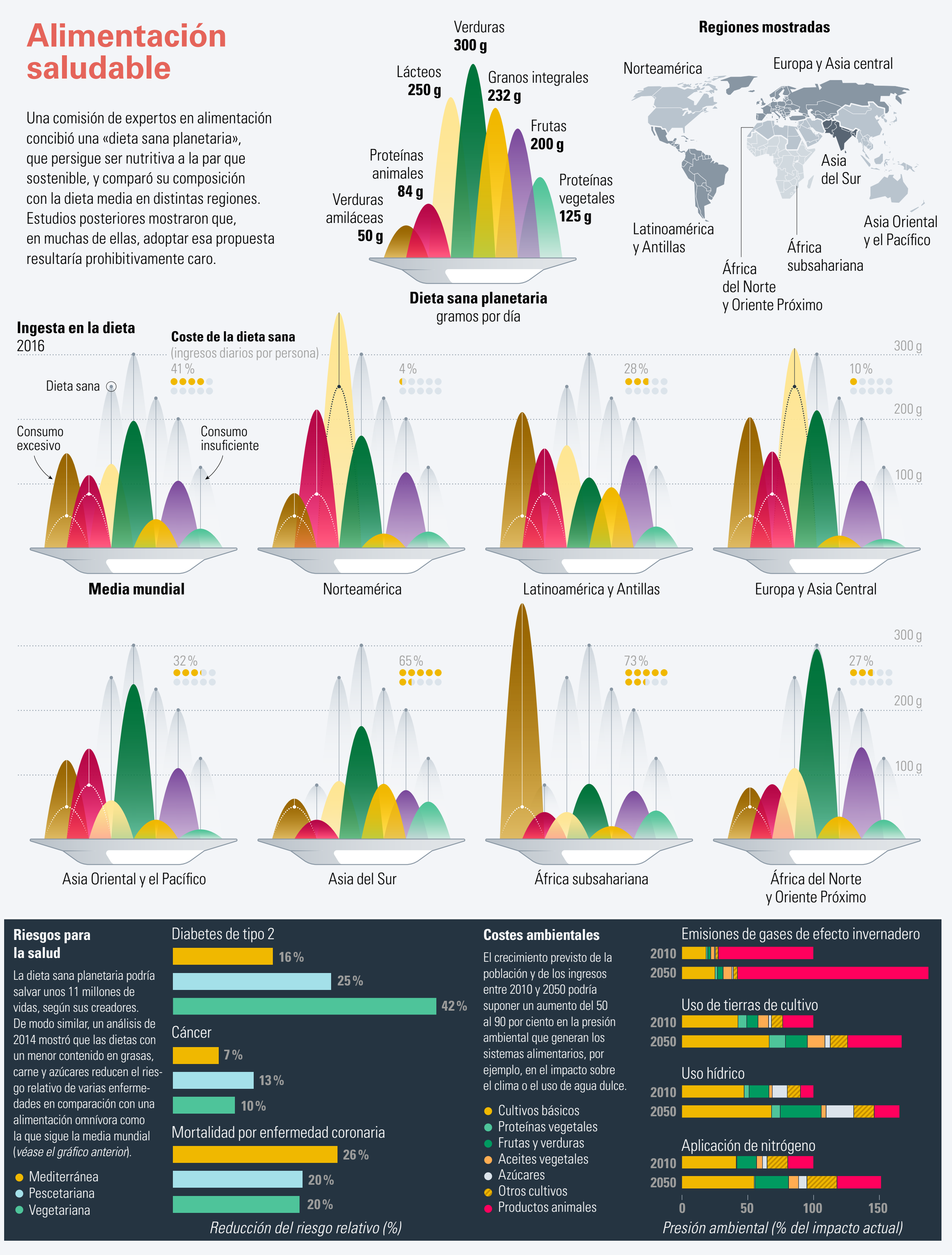
EN SÍNTESIS

El sistema alimentario industrial ya genera un cuarto de las emisiones de gases de efecto invernadero, consume el 70 por ciento del agua y explota el 40 por ciento del suelo cultivable.

Más de 2000 millones de personas presentan sobrepeso u obesidad, pero más de 800 millones no comen lo suficiente o tienen carencias en su alimentación.

La solución a este problema ambiental y de salud mundial pasa por una alimentación más equilibrada y sostenible: menos carne, más verduras y nada de productos ultraprocesados.

Además de esas virtudes, tal dieta debe ser culturalmente aceptable, asequible y no poner en riesgo la subsistencia de las economías locales. Definirla no es una tarea nada fácil.



FUENTES: «FOOD IN THE ANTHROPOCENE: THE EAT–LANCET COMMISSION ON HEALTHY DIETS FROM SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS», POR WALTER WILLETT ET AL. EN *THE LANCET*, VOL. 393, PÁGS. 447-492, FEBRERO DE 2019 (*ingestas*); «AFFORDABILITY OF THE EAT–LANCET REFERENCE DIET: A GLOBAL ANALYSIS», POR KALLE HIRVONEN ET AL. EN *THE LANCET GLOBAL HEALTH*, VOL. 8, PÁGS. E59-E66, ENERO DE 2020 (*costes*); «GLOBAL DIETS LINK ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND HUMAN HEALTH», POR DAVID TILMAN Y MICHAEL CLARK EN *NATURE*, VOL. 515, PÁGS. 518-522, NOVIEMBRE DE 2014 (*riesgos*); «OPTIONS FOR KEEPING THE FOOD SYSTEM WITHIN ENVIRONMENTAL LIMITS», POR MARCO SPRINGMAN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 562, PÁGS. 519-525, OCTUBRE DE 2018 (*costes ambientales*); JASIEK KRZYSZTOFIAK (*gráficos*)

críticas, porque sus recomendaciones no serían factibles para todo el mundo. Ahora, algunos científicos intentan definir dietas que sean sostenibles desde el punto de vista ambiental en contextos locales y que no pongan en riesgo la nutrición ni menoscaben los medios de subsistencia.

«Debemos apostar por dietas que tengan una huella ecológica mucho menor o en pocas décadas empezaremos a sufrir graves problemas globales relacionados con la pérdida de biodiversidad, el uso del suelo y todo lo demás», advierte Sam Myers, director de la Alianza por la Salud Planetaria, un consorcio mundial con sede en Boston que estudia los efectos de los cambios ambientales sobre la salud.

Emisiones en el menú

La producción de alimentos provoca una contaminación por gases de efecto invernadero tan elevada que, al ritmo actual y aunque se redujeran a cero las demás emisiones, los países seguirían siendo incapaces de limitar a 1,5 grados Celsius el alza de la temperatura, que es el objetivo fijado en el Acuerdo de París. Un gran porcentaje de las emisiones del sistema alimentario, del 30 al 50 por ciento según algunos cálculos, procede de los sistemas de producción pecuarios, debido a la ineficiencia de los animales a la hora de transformar lo ingerido en alimentos para el consumo humano.

En 2014, David Tilman, ecólogo de la Universidad de Minnesota en Saint Paul, y Michael Clark, especialista en sistemas alimentarios de la Universidad de Oxford, estimaron que los cambios en la urbanización y el crecimiento de la población a escala mundial entre 2010 y 2050 causarían un aumento del 80 por ciento en las emisiones relacionadas con la producción de alimentos.

No obstante, si todo el mundo (en promedio) comiera más vegetales y se detuvieran las emisiones del resto de sectores, el planeta contaría con un 50 por ciento de posibilidades de no superar el límite de calentamiento de 1,5 grados. Además, si la dieta mejorase en paralelo con modificaciones más extensas del sistema alimentario, tales como reducir los desperdicios, las opciones de lograr el objetivo ascenderían al 67 por ciento [*véase* «Más comida, menos desperdicios», por Chad Frischmann y Mamta Mehra; Investigación y Ciencia, diciembre de 2021].

Tales conclusiones no han sido bien recibidas por la industria cárnica. Sin ir más lejos, en 2015, cuando el Departamento de Agricultura de Estados Unidos emprendió la revisión de sus guías de alimentación (una tarea que lleva a cabo quinquenalmente), se sopesó por un momento tener en cuenta los factores ambientales ante las exigencias de los científicos al comité asesor. Pero la idea se desestimó, según parece, a raíz de las presiones del sector productivo, explica Timothy Griffin, experto en sistemas alimentarios de la Universidad Tufts que tomó parte en los esfuerzos para que se admitiera. Con todo, la gente se enteró del intento. «El mayor logro es que atrajo mucha atención hacia el tema de la sostenibilidad», valora Griffin.



LORA IANNOTTI

Determinación del peso de un niño, como parte de un estudio de pesca sostenible y nutrición infantil realizado en un pueblo cercano a Kilifi, en Kenia.

La Comisión EAT-*Lancet*, que fue financiada por la fundación Wellcome, una organización benéfica radicada en el Reino Unido, ayudó a justificar esas exigencias. Los nutricionistas revisaron la bibliografía para definir una dieta sana básica, compuesta por alimentos integrales. A continuación, el equipo fijó los límites ambientales de la dieta al incorporar las emisiones de carbono, la pérdida de biodiversidad y el consumo de agua dulce, suelo, nitrógeno y fósforo. El incumplimiento de esos límites podría convertir el planeta en un lugar inhóspito para el ser humano.

La labor de la comisión culminó con un plan de alimentación variado, con predominio de los vegetales. La cantidad máxima semanal de carne roja (para un adulto de 30 años y peso normal) que admite este régimen de 2500 calorías diarias es de 100 gramos, es decir, una sola ración. Esta cifra supone menos de una cuarta parte de lo que ingiere un estadounidense medio. Además, la dieta evita la mayoría de alimentos ultraprocesados, como los refrescos, los platos congelados o las carnes «reconstituidas», aparte de los azúcares y las grasas.

«Es posible alimentar a 10.000 millones de personas de forma saludable sin seguir destruyendo los ecosistemas»

Tim Lang, experto en políticas alimentarias, Universidad de la Ciudad de Londres

La comisión calculó que esa dieta salvaría la vida de unos 11 millones de personas al año. «Es posible alimentar a 10.000 millones de personas de forma saludable sin seguir destruyendo los ecosistemas», afirma Tim Lang, investigador de políticas alimentarias en la Universidad de la Ciudad de Londres y coautor del informe EAT-*Lancet*. «Lo quiera o no el ala dura de las industrias cárnica y láctea, se encuentran contra las cuerdas. El cambio ya es inevitable.»

Numerosos científicos defienden que la dieta EAT-*Lancet* es excelente para los países ricos, cuyos hábitos alimenticios son insostenibles y donde una persona media ingiere 2,6 veces más carne que su homóloga en los países de rentas bajas. Pero otros ponen en duda que sea lo bastante nutritiva para quienes viven en lugares con escasos recursos. Ty Beal, científico de la Alianza Mundial para la Mejora de la Nutrición, analizó la propuesta mediante cálculos no publicados y halló que aporta el 78 por ciento de la ingesta recomendada de zinc y el 86 por ciento de la de calcio para los adultos mayores de 25 años, y cubre tan solo el 55 por ciento de las necesidades de hierro de las mujeres en edad fértil.

A pesar de las críticas, la dieta ha puesto sobre la palestra los problemas ambientales. «Antes del modelo EAT-*Lancet*, no creo que estuviera entre las prioridades de los legisladores incluir la sostenibilidad en este debate mundial sobre los cambios alimentarios», apunta Anne Elise Stratton, investigadora de sistemas alimentarios de la Universidad de Míchigan en Ann Arbor.

La dieta no es una recomendación universal, recalca Marco Springmann, bromatólogo de la Universidad de Oxford e integrante del equipo principal que elaboró el modelo EAT-*Lancet*.

Desde la publicación del informe, científicos especializados en salud pública de todo el mundo han estado investigando cómo conseguir que la dieta sea viable para todos los habitantes del planeta, ya sean adultos con sobrepeso o niños desnutridos.

Dietas en países ricos

Los investigadores en nutrición son conscientes de que la mayoría de los consumidores no siguen los consejos dietéticos. Por eso, buscan maneras de convencer a la gente para que adopten una alimentación sana y sostenible. En Suecia, Patricia Eustachio Colombo, experta en nutrición del Instituto Karolinska de Estocolmo, y sus colaboradores han puesto a prueba sin demasiado bombo una dieta sostenible en las escuelas. Su labor se suma a la «nueva dieta nórdica», un movimiento social nacido en los países escandinavos que aboga por el consumo de alimentos tradicionales y sostenibles, como las verduras de temporada y la carne de caza.

El equipo de Eustachio Colombo empleó un programa informático para analizar el menú de una escuela de primaria con unos 2000 estudiantes. El algoritmo planteó propuestas para que fuera más nutritivo y respetuoso con el clima, como reducir la cantidad de carne en un estofado típico, añadiendo más alubias y verduras. Se comunicó a las familias que se estaban mejorando los menús, aunque sin revelar los detalles. Eustachio Colombo comenta que la mayoría de estudiantes no se percató del cambio, ni tampoco se registró un mayor desperdicio de comida. Ahora están repitiendo el experimento con otros 2800 alumnos.

«Los menús escolares ofrecen una oportunidad prácticamente única para fomentar hábitos alimenticios sostenibles. De adultos, tendemos a conservar las costumbres alimentarias adqui-



Puesto de comida en un mercado de Chiang Mai, Tailandia. El coste de una «dieta sana planetaria» está fuera del alcance de muchos de los habitantes del sudeste asiático.

ridas durante la infancia», explica Eustachio Colombo.

La investigadora aclara que su dieta es muy distinta a la del modelo EAT-*Lancet*. Aparte de ser más barata, contiene más alimentos con almidón, como las patatas, que son un ingrediente básico de la cocina sueca. Y también es más nutritiva y aceptable desde el punto de vista cultural, añade. «Eso pone de manifiesto la importancia de adaptar la dieta EAT-*Lancet* a las circunstancias de cada país, o incluso de los territorios que lo conforman.»

A lo largo de la costa atlántica de Estados Unidos, algunos académicos y restauradores están poniendo a prueba esa dieta en entornos con ingresos bajos. En Baltimore, una colaboración entre una empresa de *catering* y un restaurante, ambos obligados a echar el cierre durante la pandemia de COVID-19, empezó a recibir donaciones y a ofrecer comidas gratuitas basadas en las pautas de EAT-*Lancet* a familias que vivían en «desiertos alimentarios» (zonas con poco acceso a alimentos nutritivos y asequibles). Un menú incluía croquetas de salmón con verduras variadas de temporada, cuscús israelí y salsa pesto.

Un grupo de investigadores de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins encuestó a 500 personas que probaron los menús y halló que al 93 por ciento de las 242 que respondieron les había gustado o encantado la comida. ¿El inconveniente? Cada menú subvencionado costaba 10 dólares, cinco veces más de lo que contempla a día de hoy el programa nacional de cupones para alimentos.

«Salta a la vista que un cambio drástico en la alimentación permitiría darle la vuelta al impacto ambiental, pero existen barreras culturales y económicas», lamenta Griffin.

Difícil de digerir

Un obstáculo al que se enfrentan quienes investigan futuras dietas en países con ingresos medios

o bajos es averiguar de qué se alimenta la gente. «A día de hoy, es todo un misterio para mí», confiesa Purnima Menon, del Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias de Delhi, quien estudia los hábitos alimenticios en la India. Los datos sobre lo que come la gente se remontan a una década atrás, aduce.

Recabar esa información es crucial, ya que la India ocupa el puesto 101 de entre los 116 países que integran el Índice Mundial del Hambre y presenta el mayor número de niños con un peso por debajo del que les correspondería según su estatura.

Abhishek Chaudhary, experto en sistemas alimentarios del Instituto Indio de Tecnología de Kanpur que formó parte del equipo EAT-*Lancet*, y su colega Vaibhav Krishna, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, aprovecharon la información disponible para elaborar dietas destinadas a todos los estados de la India. A tal fin, emplearon un programa informático y datos ambientales locales sobre el agua, las emisiones y el uso del suelo, del fósforo y del nitrógeno. Las propuestas del algoritmo cubrirían las necesidades nutricionales, recortarían las emisiones derivadas de los alimentos en un 35 por ciento y no tensionarían otros recursos ambientales. Pero cultivar la cantidad de alimentos requerida exigiría un 35 por ciento más de suelo (algo inviable en un país sobrepoblado) o mayores rendimientos. Además, el coste de los alimentos subiría un 50 por ciento.

Las dietas sanas y sostenibles también resultan caras en otros lugares. La diversidad alimentaria promulgada por EAT-*Lancet* (frutos secos, pescado, huevos, productos lácteos y demás) resulta inalcanzable para millones de personas, asevera Iannotti.

De hecho, la adhesión de una persona típica a la dieta en 2011, último año para el que se dispone de datos sobre el precio de los alimentos, habría supuesto un coste medio mundial de 2,84 dólares al día, unas 1,6 veces superior al de una comida nutritiva básica.

No acaban aquí los problemas de índole práctica. Consideremos las restricciones relacionadas con la carne, por ejemplo. En zonas con carencias nutritivas y donde los alimentos que prescribe la dieta no están disponibles, los productos de origen animal representan otra fuente básica de nutrientes fácilmente asimilables, más allá de los vegetales, sostiene Iannotti. En muchas regiones de países con ingresos bajos, la agricultura y la ganadería se articulan en torno a pequeñas granjas familiares, donde tanto los productos cultivados como los animales se pueden vender en tiempos de necesidad, explica Jimmy Smith, director general del Instituto Internacional de Investigaciones Pecuarias de Nairobi.

«Un campesino del macizo etíope posee tres o cuatro animales lecheros en su corral, y todos son miembros de la familia y tienen nombre», detalla.

Menon subraya que, de momento, los científicos de las regiones con ingresos bajos o medios están más preocupados por la nutrición que por preservar el ambiente. La FAO ha creado un comité para llevar a cabo un análisis más exhaustivo que el de EAT-*Lancet*. Ese nuevo estudio, que se publicará en 2024, será más inclusivo a escala mundial y abarcará temas como la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la ganadería, afirma Iannotti, que forma parte del comité. «Creemos que la revisión de los datos no fue totalmente equilibrada ni integral», relata. «Vayamos un paso más allá y asegurémonos de contar con datos de todo el planeta.»

Encontrar una alimentación sostenible en los países pobres pasa por trabajar codo con codo con las comunidades y los ganaderos, como en Kilifi, sostienen los científicos. Clark, que ha diseñado dietas a escala mundial a partir de predicciones basadas en modelos, piensa que los expertos en sistemas alimentarios deben incorporar ahora ajustes y retoques locales para lograr que la gente coma mejor.

«Quienes trabajan en sostenibilidad alimentaria deben visitar las comunidades y preguntarles qué creen que sería bueno para ellas. Y, a partir de ahí, ver cómo buscar soluciones que interesen a esas comunidades», concluye.

Gayathri Vaidyanathan
es periodista científica
y licenciada en bioquímica.



Con la colaboración de **nature**

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por Investigación y Ciencia con el permiso de Nature Research Group© 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Alimentación sostenible. Jonathan A. Fowley en *IyC*, enero de 2012.

Transformar el sistema alimentario global. Günther Fischer en *IyC*, marzo de 2019.

Ni la carne es tan mala ni la quinua tan buena. Jaime Martínez Valderrama en *IyC*, agosto de 2021.

El poder de la agroecología. Raj Patel en *IyC*, enero de 2022.

¿CUÁN LEJOS PUEDE VOLAR UNA HOJA DE PAPEL?

Una hoja de papel puede alcanzar los cien metros de distancia. Para conseguirlo, solo hay que usar los conocimientos de la física y la aeronáutica

Marc Boada

¿Cuál es la mejor forma de hacer volar una simple hoja de papel? ¿Cómo podemos hacer para que esta recorra la máxima distancia? Esa es la pregunta que formulo a mis alumnos nada más empezar uno de los talleres científicos más lúdicos y pedagógicos que conozco. En su juvenil imaginación aparecen de inmediato todo tipo de respuestas. La primera consiste en pergeñar un aeroplano de papel (el típico avión) y lanzarlo esperando que la suerte, el viento y, sobre todo, el diseño aerodinámico colaboren en llevarlo muy, muy lejos. Otra opción que a menudo proponen los más jóvenes es la de arrugar el papel, formar una bola compacta y lanzarla con la mayor fuerza posible, confiando que la inercia sea suficiente para alcanzar una gran distancia. No obstante, hay una alternativa más interesante y formativa —aunque menos evidente—: construir un cohete. Este será el propósito de la columna de este mes.

Aclaremos primero que esta actividad está inspirada en una propuesta del Exploratorium de San Francisco, uno de los centros de ciencia más antiguos y prestigiosos del mundo. El experimento es de una simplicidad pasmosa: consiste en construir un cohete con poco más que una hoja de papel e impeler este solo con aire comprimido.

Nosotros llevaremos la clásica propuesta del Exploratorium mucho más lejos, literalmente, ya que si se mejora el modelo original puede aumentarse espectacularmente la distancia de vuelo. Exploraremos la construcción del cohete y sugeriremos nuevas líneas de investigación y desarrollo con un objetivo: llegar a los cien metros de distancia —algo que, quien esto escribe, pese a estar muy cerca, aún no ha conseguido—.

En una primera aproximación, nuestro cohete consiste en un cilindro de papel cerrado por un extremo, en el cual inyectaremos aire a presión con un aparato muy básico: una botella de plástico. Miremos el dibujo de la página siguiente para comprender el conjunto. Sobre el suelo hay una botella vacía de agua con gas (en concreto, de gaseosa). De la boca de esta sale un trozo de manguera de riego, escogida para que encaje

EL EXPERIMENTO

Construiremos un cohete de papel, que impulsaremos mediante la compresión del aire de una botella.

MATERIALES

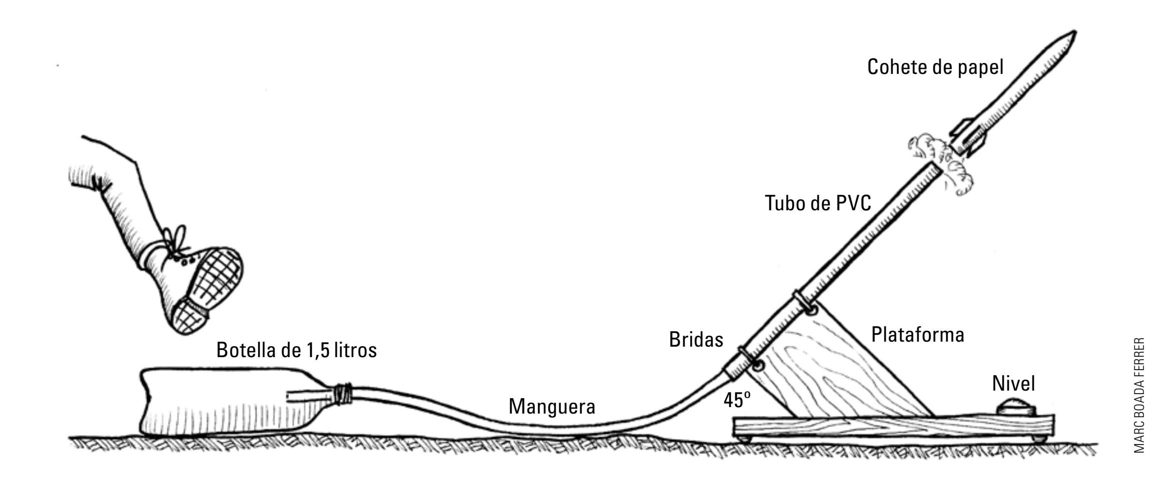
Folios de papel
Cartulina
Cinta adhesiva de carrocero
Tubo de PVC de 25 × 20 × 400 mm
1 metro de manguera de riego (diámetro 20 mm)
Botella de gaseosa de 1,5 litros

TIEMPO

Unos minutos (con el material a punto)

DIFICULTAD

Baja



herméticamente en el cuello de la botella. En el extremo libre de la manguera se adapta, también perfectamente, un trozo de tubería de PVC (o similar), de 25 milímetros de diámetro exterior, 20 de interior y unos 40 centímetros de longitud. El tubo puede ser aguantado por un alumno o con una base de madera. Nuestro proyectil de papel encaja a la perfección en este tubo, de forma que, cuando damos un fuerte pisotón a la botella, el aire se comprime en el interior del sistema e impulsa la aeronave, ya que es el único punto de salida. Debemos considerar, por tanto, tres ámbitos: el cohete, el sistema de impulsión y las condiciones atmosféricas (que también desempeñan un papel importante, tratándose de un artefacto volador de pocos gramos de peso).

Empecemos con la construcción de un modelo básico. Para el fuselaje utilizaremos una hoja de papel apaisada. La enrollaremos sobre el tubo de PVC, que hará también las funciones de plantilla. Para los alerones emplearemos un cuadrado de cartulina, más resistente, de unos 10 × 10 centímetros. Recortados los cuatro alerones, les haremos un pliegue para conseguir una pestaña y los pegaremos al fuselaje con cinta de carrocero de 15 milímetros de ancho. Luego cerraremos la punta del aparato (la ojiva) haciendo unos pliegues, que fijaremos con más cinta autoadhesiva. Llamaremos a este modelo **cohete 1** [*véase el recuadro* «Laboratorio de aeronáutica»].

Ya en las primeras pruebas comprobaremos que este diseño, aunque simple, ofrece una baja calidad aerodinámica. La ojiva de forma poco regular y asimétrica puede generar (si la construcción es poco precisa) graves problemas de direccionalidad, ya que se comporta como un pequeño alerón en el morro del aparato y desvía fácilmente la trayectoria en vuelo; además, es muy sensible al viento lateral.

Intentaremos, pues, refinar la construcción de este modelo básico y exploraremos todo un abanico de mejoras que nos han de acercar al reto de los 100 metros de alcance.

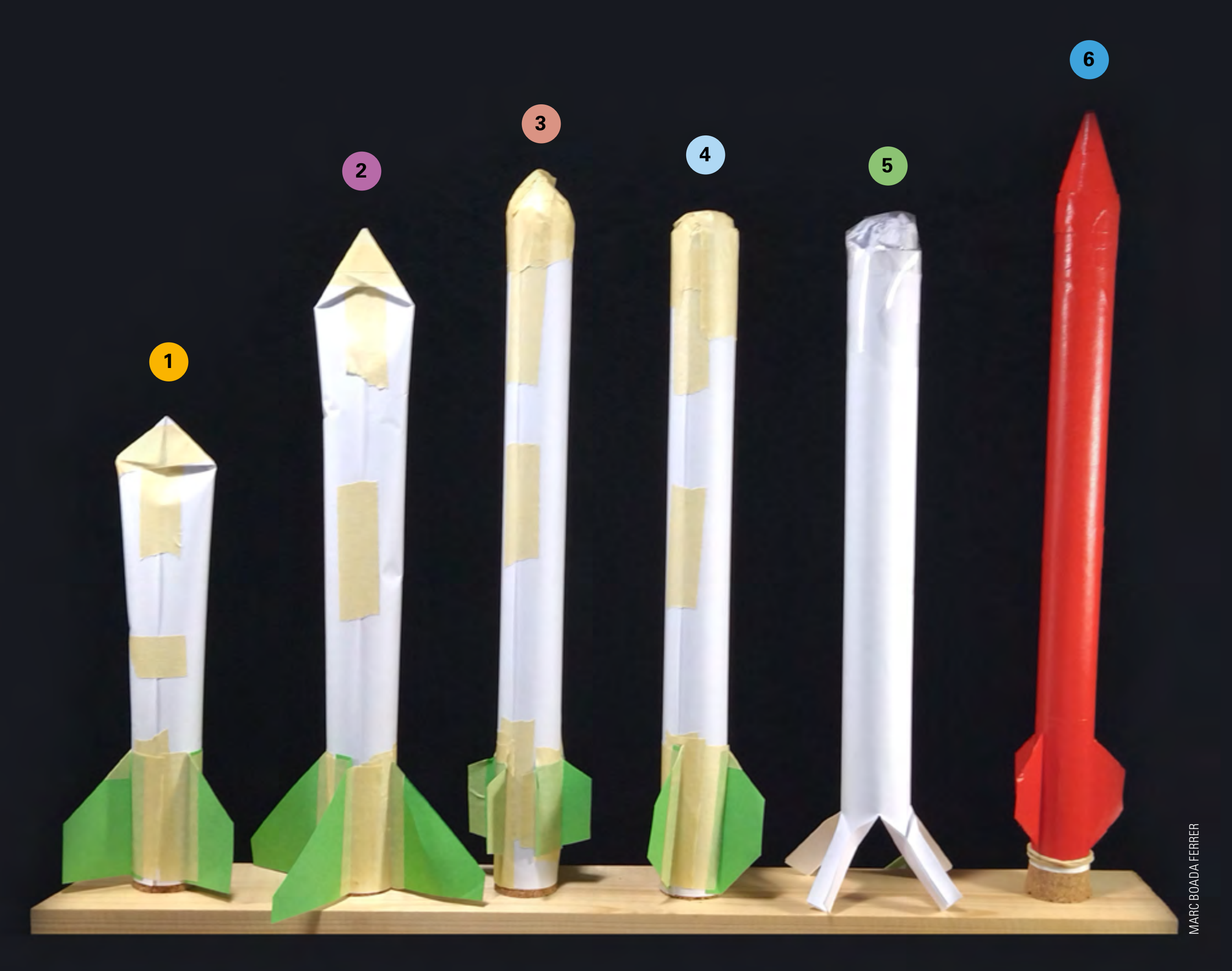
Una primera modificación consiste en unaumento de la longitud del fuselaje (**cohete 2**). Ello incrementa el tiempo durante el cual el cohete recibe el impulso del aire comprimido y, por tanto, aumenta la velocidad de salida. Resultado: un mayor alcance.

Veamos ahora qué juego nos pueden dar los alerones. La función de estos no es otra que guiar la aeronave para que siga una trayectoria rectilínea. Pero debemos considerar también su efecto aerodinámico, que puede resultar pernicioso. En el modelo básico (**cohete 1**) se instalan cuatro alerones de gran tamaño en forma de triángulo rectángulo. Sin duda, proporcionan una gran direccionalidad, pero también ofrecen una brutal resistencia aerodinámica que tiende a frenar el aparato y, por tanto, a reducir la distancia de vuelo. Alguien podría objetar que los alerones también aumentan la sustentación, pero eso es muy difícil, ya que su perfil en nada se asemeja al de un ala (que sí proporciona sustentación). He comprobado que unas dimensiones reducidas son más que suficientes (tal y como veremos más adelante en los modelos 3 y 4).

En nuestro siguiente intento de mejora modificaremos la ojiva y los alerones. Vayamos por pasos. En este caso, después de preparar el fuselaje como en el **cohete 2** (versión larga del **cohete 1**), cerraremos el cilindro con cinta de

LABORATORIO DE AERONÁUTICA

La capacidad de vuelo de un cohete de papel depende de varios factores. Veamos en esta comparativa de modelos algunos de los más críticos. El cohete 1 es el más básico, construido con una hoja de papel apaisada. El cohete 2 es igual que el 1 pero más largo; a mayor longitud, mayor es el tiempo durante el cual recibe el impulso del aire comprimido y, por tanto, mayor la velocidad de salida y, finalmente, el alcance. El cohete 3 tiene modificaciones en la ojiva (forma cónica y con peso interior) y unos alerones reducidos; con ello logramos un alcance todavía mayor que el del cohete 2. En el cohete 4 se han inclinado los alerones respecto del eje del aparato; ello favorece una rotación que estabiliza el vuelo, pero, en cambio, reduce el alcance (quizá por un exceso de inclinación). El cohete 5 corresponde a una de mis múltiples pruebas fallidas. Con el propósito de simplificar la construcción, los alerones se han recortado del propio fuselaje; sin embargo, la fricción con el aire es tan importante que vuela menos que el 1. El cohete 6, todavía en fase de pruebas, incorpora ciertas mejoras en la ojiva y los alerones; además, se ha pintado para que resulte más hermético, se ha añadido una goma elástica en la base para mejorr el ajuste con el tubo de lanzamiento y se ha lubricado este con polvos de talco. Con todo ello logramos duplicar el alcance del cohete 2.



1
Alerones Básicos
Ojiva Básica
Peso total 7 gramos
Alcance Menos de 40 metros

2
Alerones Básicos
Ojiva Cierre con graves fugas de aire
Peso total 7 gramos
Alcance Unos 40 metros

3
Alerones Reducidos
Ojiva Cónica, incluye un peso de 3 gramos
Peso total 11 gramos
Alcance Más de 60 metros

4
Alerones Reducidos
Ojiva Cónica
Peso total 8 gramos
Alcance Más de 50 metros

5
Alerones Recortados del fuselaje
Ojiva Cónica
Peso total 7 gramos
Alcance Menos de 30 metros

6
Alerones Solo 3
Ojiva Más refinada, incluye un peso de 3 gramos
Peso total 12 gramos
Alcance Unos 80 metros

carrocero. Luego amasaremos con las palmas de las manos los restos de papel hasta formar una bola esférica que encaje exactamente en el fuselaje (lo mejor es arrugar y alisar el papel dos o tres veces, de forma que se torna mucho más flexible y maleable). Introduciremos la bola en el extremo contrario a los alerones, hasta su ecuador, fijándola sobre el fuselaje con varios trozos de cinta adhesiva y comprobaremos que la unión sea totalmente hermética. Ya tenemos el **cohete 3**. Vamos a probarlo.

Construiremos nuestra base de lanzamiento con cualquier apaño que nos permita mantener el tubo de PVC con una inclinación de 45 grados, ya que entonces nuestro cohete alcanzará una distancia máxima. Pero habrá que considerar ciertos detalles. El primero es una buena estabilidad, ya que cuando el cohete sale disparado de la plataforma puede superar sin problemas los 100 kilómetros por hora. Ello implica que la base experimenta cierto retroceso, que, si no es absorbido por una buena masa, puede mover el conjunto y afectar a la trayectoria de vuelo.

(El lector interesado encontrará en Internet múltiples modelos realizados con tubería rígida de PVC, que, en las pruebas que he realizado, no mejora en nada la disposición ya descrita de «botella-manguera-tubo». Los motivos son varios. La manguera, siendo flexible, aísla a la plataforma de posibles movimientos espurios. También tiene un volumen mínimo, con lo que la presión es más elevada y el caudal de salida mayor.)

Otro detalle que tampoco es nimio corresponde a la propia botella de impulsión. En las pruebas que he realizado, las que mejor funcionan son las de 1,5 litros, y es casi obligatorio que sea de alguna bebida gaseosa, ya que entonces sus paredes son especialmente resistentes. Quizás algún lector piense que cuanto mayor sea la botella, mejor, ya que entonces habrá más aire para comprimir. Pero en realidad no es así. Con el mismo pisotón, una garrafa de 5 o 6 litros comprime el aire menos que una de 1,5 litros. Además, esta última contiene aire más que suficiente para impulsar un cohete con un volumen interno de unos 150 centímetros cúbicos.

Por cierto, ¿cuál es la manera más eficiente de comprimir el aire de la botella? Pues con un simple pisotón. Pero un pisotón óptimo: la botella de plástico debe pisarse con un solo pie, ya que si lo hacemos con los dos, lo más probable es que se rompa por la base. También debe pisarse con mucha fuerza y, atención, rapidez. De seguirse estos consejos, la presión en el interior del sistema puede llegar a 20 o 30 kilopascales —quizá más—, lo que propulsará nuestra nave a decenas de metros por segundo en el momento del despegue.

Pongamos, pues, en el tubo el cohete recién construido, introduciéndolo en su totalidad. Revisemos que la manguera se halle perfectamente encajada. Y habrá llegado el momento del despegue: 3, 2, 1... ¡soltemos un pisotón épico justo en el centro de la botella! Para asombro de los espectadores, el cohete saldrá disparado y describirá una preciosa trayectoria parabólica que lo llevará a decenas de metros de distancia.

El reto está sobre la mesa: ¿podemos ir más lejos? ¿Será posible alcanzar los 100 metros? Pues todo indica que sí. Reflexionemos un poco y veremos que se abren ante nosotros varias líneas de desarrollo. Apuntaremos algunas.

La primera: el propio fuselaje. En el fondo, es un recipiente en el que durante unas centésimas de segundo la presión adquiere valores notables. ¿Es capaz de mantener esa presión? Podemos comprobar experimentalmente que no, ya que el papel es un material poroso. ¿Alguna solución? Podemos impermeabilizarlo con una capa de pintura. Ello aportará rigidez estructural, mejorará su aspecto y reducirá la fricción aerodinámica.

Y la masa, ¿cómo influye? Nuestro cohete llegará más o menos lejos en función de su peso. Si es muy ligero, tendrá poca inercia y sufrirá un gran freno por el aire atmosférico. Pero si pesa demasiado, la presión del aire comprimido será insuficiente para acelerarlo a gran velocidad. Una hoja de papel DIN A4 de 80 gramos por metro cuadrado pesa solo 5 gramos, a estos hay que sumar la cinta adhesiva y la pintura, lo que lleva el peso de la aeronave a unos 7 u 8 gramos.

En las pruebas que han realizado mis alumnos, la inclusión en el interior de la esfera de papel de una piedrecilla del tamaño de un garbanzo con un peso de 2 o 3 gramos ha mejorado notablemente el alcance. Pero ¿debería pesar aún más? ¿Podríamos poner una pequeña bola de acero, o de plomo, y llegar más lejos? No lo sabemos. Hará falta que alguien optimice ese parámetro mediante pruebas sistemáticas.

Finalmente, para aumentar el coeficiente de penetración, podemos moldear la punta semiesférica o revestirla de cinta adhesiva hasta formar la típica ojiva cónica de los cohetes reales. He aquí el **cohete 6**.


OAKLAND DISCOVERY CENTER

En el momento del disparo hay que atender a la dirección y velocidad del viento. Una eyección con el viento a favor es muy, muy distinta de otra con el viento en contra. Disponer de un cataviento o una veleta nos ayudará a acertar. Y no solo una: mejor situar varias veletas a lo largo del campo de lanzamiento, porque durante el trayecto el proyectil puede encontrar zonas de turbulencia que alteran la trayectoria. Visualizarlas antes del disparo garantiza que nuestra aeronave no aterrice en casa del vecino.

En fin, teniendo en cuenta todas estas múltiples variables, pergeñar un cohete «perfecto» o, mejor dicho, «óptimo» se convierte en algo muy creativo y formativo, sobre todo para estudiantes de secundaria y bachillerato, y más todavía cuando se entra en las cuestiones sobre aeronáutica: ¿a qué velocidad sale el cohete y qué relación tiene esta con su masa? Si lo disparamos verticalmente, ¿qué altura puede alcanzar y cómo la podríamos medir? ¿Qué rendimiento tiene nuestra máquina? Es decir, ¿qué parte de la energía invertida en pisar mecánicamente la botella se convierte en movimiento real? El docente o el experimentador interesado encontrará abundante bibliografía para tratar estos aspectos con todo el rigor matemático.

Terminemos diciendo que podemos ampliar enormemente el campo de experimentación si abrimos solo un poco más los parámetros de diseño. Con tan solo sustituir la hoja de papel DIN A4 por una A3 y aumentando ligeramente el diámetro del tubo, la eficiencia mejora muchísimo, tanto que, en las pruebas previas que he realizado, el límite de los 100 metros se ve al alcance de la mano. ¿Quién lo conseguirá?

También podemos reconsiderar los alerones. Como ya hemos visto más arriba, cuanto menos sobresalen del fuselaje, menor freno aerodinámico ofrecen. Con todo, podemos explorar combinaciones entre su número, tamaño y forma. Uno de mis alumnos propuso recortar los alerones del propio fuselaje, con el objetivo de simplificar la construcción del aparato (nos referimos al **cohete 5**). Sin embargo, se demostró que todo aquello que no sea un alerón delgado reduce espectacularmente el alcance del cohete. También podemos diseñar alerones largos pero estrechos, con los extremos recortados aerodinámicamente, y además ponerlos ligeramente inclinados respecto al eje vertical del cohete, de forma que induzcan una rotación del aparato que lo estabilice (**cohete 4**). Incluso podemos poner otros alerones muy pequeños justo bajo la ojiva —lo probaron algunos de mis alumnos y funcionó muy bien—.

Veamos ahora si podemos emplear un sistema de lanzamiento que sea más «científico». Pisar fuertemente la botella funciona. Pero va todavía mejor soltar un peso de varios kilos atado a una palanca. De esta forma, la repetitividad será total. También fijaremos la base de lanzamiento al suelo y la nivelaremos para que forme un ángulo exacto de 45 grados. Más aun, la fricción entre el cohete y el tubo de plástico ejerce una influencia notable. Por ello pondremos una capa de polvos de talco en el tubo, que mejorará perceptiblemente el alcance. Y si queremos que el ajuste sea aún más preciso, pondremos una goma elástica casi en la base (**cohete 6**). No demasiado apretada, claro.

Marc Boada Ferrer
es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

PARA SABER MÁS

El enigma de la sustentación aerodinámica. Ed Regis en *IyC*, mayo de 2020.

JUEGO DE MINORÍA

El modelo paradigmático de la econofísica

Bartolo Luque

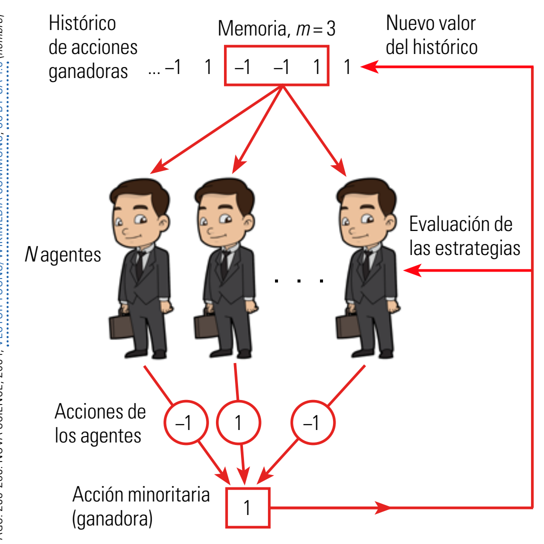
El interés de los matemáticos y los físicos por la economía tiene una larga tradición. Sirva como ejemplo la teoría de la utilidad, esbozada por Daniel Bernoulli en el siglo XVIII y precursora de la teoría de juegos que desarrollaron John von Neumann y Oskar Morgenstern en los años cuarenta; o el modelo de caminatas aleatorias para describir series temporales de precios que presentó Louis Bachelier en 1900 y que allanó el camino para obtener la famosa fórmula de Black y Scholes, la cual permite valorar opciones financieras.

Pero fue en la década de los ochenta, a raíz de la disponibilidad de ingentes cantidades de datos financieros, cuando las grandes firmas empezaron a contratar de forma masiva a matemáticos y físicos, apodados *quants*, para analizar los mercados. Ya en los noventa, y bajo el paraguas de los sistemas complejos, el nutrido corpus de publicaciones académicas sobre economía y mercados financieros que habían generado esos expertos dio lugar a una nueva disciplina, bautizada como «econofísica» por el físico estadístico Harry Eugene Stanley.

Intentando emular los éxitos de la física estadística, la econofísica comenzó a estudiar fenómenos macroeconómicos a partir de las interacciones microscópicas de sus agentes. El problema del bar El Farol, que tratamos el mes pasado, fue el primer paso hacia el análisis de la dinámica de un conjunto de agentes que toman decisiones y ganan o pierden en función de las que adopta el resto. Poco después, ese problema se generalizó para dar



ISTOCK_ONESPIRIT/ISTOCK



1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA de un juego de minoría con *N* agentes que deciden comprar (1) o vender (–1) en función de las decisiones ganadoras de las tres últimas rondas.

lugar al llamado «juego de minoría», un modelo sencillo que simula los elementos esenciales de un mercado de N agentes que compran y venden, y van adaptando sus decisiones en función de las que han tomado los demás. En concreto, el juego de minoría constituye una formulación matemáticamente precisa del problema del bar El Farol, donde tanto las estrategias como la información que usan los agentes están bien definidas en un determinado espacio de posibilidades.

Juego de minoría: menos es más

Un juego de minoría es un modelo con N agentes que, en cada ronda, escogen comprar o vender. Como en el juego de los chinos, los participantes toman esas decisiones de manera simultánea e independiente. Si, en la ronda t, el agente i compra, diremos que su acción ha sido $a_i(t) = 1$, y si vende, $a_i(t) = -1$. Cuando hay más agentes que compran en comparación con los que venden, existirá más demanda que oferta: los vendedores estarán en minoría y saldrán ganando. Y a la inversa: si el grupo minoritario es el de los compradores, estos serán los beneficiados, al haber más oferta que demanda. Así pues, la «acción ganadora» en la ronda t será 1 si los compradores acabaron en minoría y –1 en caso contrario. El número de agentes N se supone impar para evitar un posible empate y garantizar que siempre existe una minoría.

¿Cómo determinan los agentes sus acciones en cada ronda? La única información de la que disponen todos es la lista de las acciones o decisiones ganadoras en las rondas anteriores. Este histórico de resultados es una cadena de –1 y 1, cuya longitud coincide con el número de rondas jugadas hasta ese momento.

El modelo limita la racionalidad de los agentes fijando una «memoria» (también llamada, con cierta sorna, tamaño cerebral), de modo que los agentes solo consideran los m últimos valores de la lista de decisiones ganadoras a la hora de elegir su próxima acción. Pongamos que hemos simulado $t = 7$ rondas y esa lista es

$$1,\ -1,\ -1,\ 1,\ -1,\ -1,\ 1.$$

Si el tamaño de la memoria es $m = 3$, los agentes tomarán sus decisiones en función de los tres últimos valores: –1, –1 y 1. Esta cadena les informa de que, hace tres rondas, quedaron en minoría quienes eligieron –1 (los vendedores); hace dos, ganaron de nuevo los vendedores y, en la última ronda, acertaron quienes eligieron 1 (los compradores). A partir de esa información, los agentes deben inducir cuál es la acción correcta en la próxima ronda. Por cierto, al comenzar el juego, se parte de un histórico de decisiones ganadoras con m valores elegidos al azar.

En cada ronda, los agentes deciden sus acciones mediante estrategias, que, en este contexto, son tablas donde a cada posible cadena de m números binarios de entrada (los m últimos valores del histórico de decisiones ganadoras) se le asigna una acción (1 o –1) de salida. Es decir, los agentes toman sus decisiones a través de funciones booleanas. Siguiendo con nuestro ejemplo, si la memoria de los agentes abarca tres pasos de tiempo, esas funciones booleanas deben determinar la acción para $2^3 = 8$ posibles historias. La siguiente tabla muestra un ejemplo de estrategia:

Entrada			Salida
–1	–1	–1	–1
–1	–1	1	–1
–1	1	–1	1
–1	1	1	–1
1	–1	–1	–1
1	–1	1	1
1	1	–1	–1
1	1	1	1

En nuestro caso, como los tres últimos valores del histórico son –1, –1, 1, el agente i que use esta estrategia decidirá vender, $a_i(t=8) = -1$. Una vez que hayan actuado todos los agentes, comprobamos qué grupo ha quedado en minoría en la ronda $t = 8$. Si son los vendedores, añadiremos un –1 al histórico, cuyos tres últimos valores pasarán a ser –1, 1, –1. Si son los compradores, agregaremos un 1 y tendremos –1, 1, 1. En cualquier caso, esos tres valores constituirán la entrada para las estrategias de los agentes en la próxima ronda.

Como hemos visto, para especificar una estrategia hay que definir las salidas para 2^m cadenas de entrada. Dado que cada salida puede tomar dos valores, 1 o –1, el número total de posibles estrategias asciende a 2^{2^m}. Al inicio del juego, a cada agente se le asignan al azar s de esas estrategias, lo cual garantiza que las respuestas sean heterogéneas. Este es un requisito esencial, pues si todos los agentes previesen (por ejemplo) que la mayoría va a comprar, todos decidirían vender, lo que invalidaría el pronóstico y haría perder al colectivo entero. Pero ¿cómo decide cada agente qué estrategia usar en cada ronda?

Adaptarse o morir

La capacidad de adaptación de los agentes (que también necesitábamos en el modelo del bar El Farol a fin de implementar la inducción) se obtiene evaluando las estrategias según su desempeño. Al inicio del juego, a todas las estrategias se les asigna una puntuación cero. Cuando acaba cada ronda, los agentes conceden un punto a todas las estrategias que habrían predicho la decisión ganadora y restan un punto a las demás. Y, en la siguiente ronda, usan la estrategia más existosa hasta ese momento de las s que tienen a su disposición. Si hay más de una estrategia con la misma puntuación, escogen entre ellas al azar.

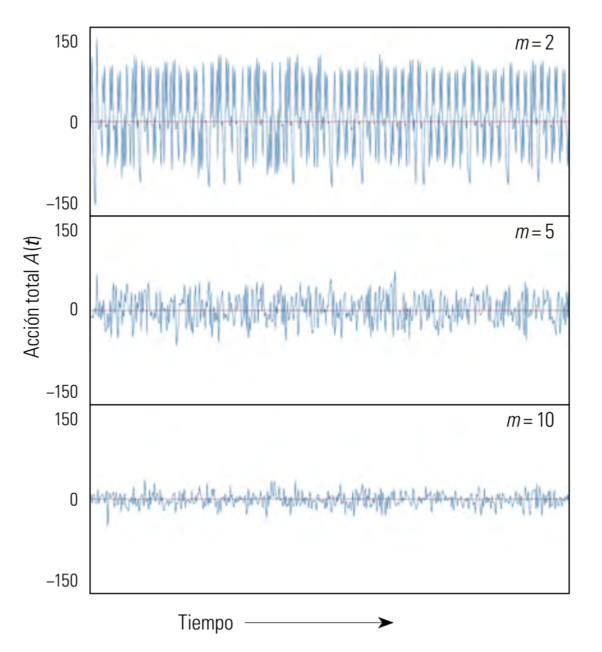
Igual que hicimos en la columna anterior, podemos explorar este modelo mediante el simulador en línea NetLogo, que permite elegir el número de agentes N, el tamaño de la memoria m y la cantidad de estrategias s que posee cada agente. El algoritmo representa, entre otras cosas, la acción total $A(t)$, que es la suma de todas las acciones individuales $a_i(t)$ de los agentes en función del tiempo:

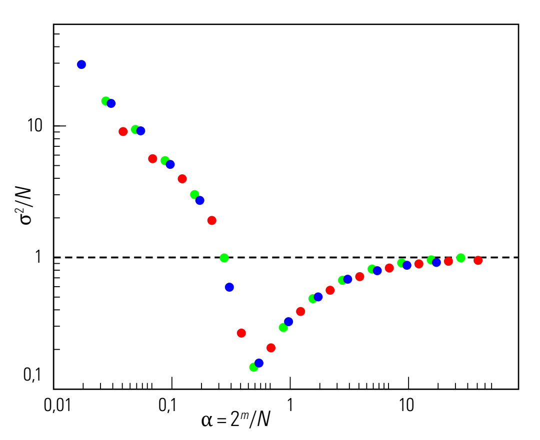
$$A(t) = \sum_{i=0}^{n} a_i(t)$$

La figura 2 (*izquierda*) muestra tres ejemplos de la evolución de $A(t)$, para un conjunto de N = 501 agentes con s = 2 estrategias y memorias de tres tamaños distintos: m = 2, 7 y 15. Vemos que la media de $A(t)$ para tiempos largos, es decir, para muchas rondas del juego, siempre es cero. (El simulador NetLogo usa los valores 1 y 0 en vez de 1 y –1, por lo que allí la media es $N/2$.)

Volatilidad y eficiencia

Como vimos el mes pasado, podemos caracterizar las fluctuaciones de $A(t)$ en torno a su valor





2. EVOLUCIÓN DE LA ACCIÓN TOTAL (*izquierda*) en un juego de minoría con N = 501 agentes, s = 2 estrategias y distintos tamaños de la memoria (m = 2, 5 y 10). La varianza o volatilidad por agente (*derecha*) presenta un mínimo para cierto tamaño crítico de la memoria. Los puntos corresponden a simulaciones con s = 2 y N = 201 (*rojo*), 301 (*verde*) y 501 (*azul*), pero el comportamiento cualitativo es el mismo para cualquier s ≥ 2.

FUENTE: «MINORITY GAME: AN INTRODUCTORY GUIDE», ESTEBAN MORO EN *ADVANCES IN CONDENSED MATTER AND STATISTICAL MECHANICS*, DIRIGIDO POR ELKA KORUTCHEVA Y RODOLFO CUERNO, PÁGS. 263-286. NOVA SCIENCE, 2004

medio a través de la desviación típica σ. Este parámetro representa el tamaño característico del grupo mayoritario y, en consecuencia, cuanto más grande sea, más ineficiente será la dinámica de los agentes. De hecho, la varianza σ^2, que en economía se conoce como volatilidad, es el inverso de la eficiencia global del mercado. Por ende, de los tres casos mostrados en la figura 2, el más eficiente sería aquel con $m = 10$, ya que presenta las fluctuaciones más bajas.

Los agentes pueden usar la información de forma inductiva para predecir con poca incertidumbre futuros movimientos del mercado

Fijados los parámetros N, m y s, podemos ejecutar la simulación y calcular el valor de σ^2 para la serie temporal de la acción total $A(t)$. Los econofísicos descubrieron que, para s fijo, al representar $\alpha = 2^m/N$ frente a la volatilidad por agente σ^2/N se obtenía una curva como la de la parte derecha de la figura 2. Los puntos de esa gráfica representan los resultados de simulaciones con $s = 2$ (aunque el comportamiento cualitativo es el mismo para cualquier $s \geq 2$) y distintos valores de N y m. Para valores bajos de α, la volatilidad por agente es elevada, mientras que para valores altos de α ocurre lo contrario. La curva presenta un mínimo en $\alpha = \alpha_c \approx 1/2$. Es decir, existe un tamaño crítico de la memoria, m_c, que conduce al mejor acuerdo posible entre compradores y vendedores. Ese valor garantiza que las fluctuaciones de $A(t)$ en torno a 0 (y, por tanto, de los precios) son pequeñas.

¿Azar o coordinación?

Ahora estamos en condiciones de responder a la pregunta que nos hacíamos en nuestra columna anterior: ¿es la estrategia aleatoria la óptima desde el punto de vista colectivo? Si los agentes del juego de minoría tomaran sus decisiones siempre al azar, con probabilidad 1/2 de comprar y 1/2 de vender, el valor medio de $A(t)$ sería cero y la varianza valdría

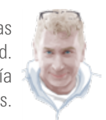
$$\sigma^2 = (N/2)(0-1)^2 + (N/2)(0+1)^2 = N,$$

con lo que la varianza por agente sería $\sigma^2/N = 1$. En nuestra gráfica, hemos señalado ese valor mediante una línea horizontal discontinua. Vemos claramente que existe un intervalo alrededor del mínimo α_c donde la adaptación inductiva del modelo ofrece mejores resultados que el azar.

Así pues, el modelo muestra que los agentes pueden usar la información de forma inductiva para predecir con poca incertidumbre futuros movimientos del mercado. La adaptación en el punto crítico conduce a una coordinación entre los agentes que permite alcanzar la mejor solución colectiva.

El juego de minoría fue propuesto en 1997 por los físicos teóricos Damien Challet y Yi-Cheng Zhang y, en poco tiempo, se convirtió en el modelo de Ising de la econofísica. Sin embargo, los economistas no parecen muy impresionados por el trabajo de los econofísicos. Siguen haciendo predicciones erróneas mientras giran los hielos de un vaso de whisky, y explicando *a posteriori* por qué se equivocaron sin dejar de girarlos. Eso sí, las empresas que operan en bolsa no han dejado de contratar más y más *quants* desde los ochenta.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



PARA SABER MÁS

An introduction to econophysics. Rosario N. Mantegna y H. Eugene Stanley. Cambridge University Press, 2000.

Theory of financial risks: From statistical physics to risk management. Jean-Philippe Bouchaud y Marc Potters. Cambridge University Press, 2000.

Una breve introducción a la econofísica. Ricardo Mansilla Corona. Equipo Sirius, 2003.

Minority game: An introductory guide. Esteban Moro en *Advances in Condensed Matter and Statistical Mechanics*, dirigido por Elka Korutcheva y Rodolfo Cuerno, págs. 263-286. Nova Science, 2004.

Minority games: Interacting agents in financial markets. Damien Challet, Matteo Marsili y Yi-Cheng Zhang. Oxford University Press, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La dinámica de la Bolsa: una mirada desde la física y la economía. Jaume Masoliver y Josep Perelló en *IyC*, enero de 2007.

Modelos matemáticos de la riqueza. Ricardo López Ruiz y Carmen Pellicer Lostao en *IyC*, marzo de 2011.

¿Es inevitable la desigualdad? Bruce M. Boghosian en *IyC*, enero de 2020.

El problema del bar El Farol. Bartolo Luque en *IyC*, julio de 2022.

LIBROS

LECCIONES PARA EL *HOMO URBANUS*

El reto mayúsculo de alimentar a las grandes urbes y deshacerse de sus desperdicios



Ciudades hambrientas
Cómo el alimento moldea nuestras vidas
Carolyn Steel
Capitán Swing, 2020
488 páginas

Lo que usted y yo vamos a comer en los próximos días aún no ha llegado a la ciudad, y puede que ni siquiera al país. Este dato, que hasta hace poco no era sino una curiosidad que nos animaba a descubrir el camino que recorren los alimentos hasta nuestras mesas, ahora nos genera inquietud o incluso temor. La pandemia y la guerra en Ucrania, que ha exacerbado la crisis energética, nos recuerdan que los alimentos vienen de lugares lejanos, y que su producción y transporte requieren mucha energía, la cual debe ser barata para que todo funcione. Eso hace de *Ciudades hambrientas* una obra plenamente actual, cuyas páginas ya no se leen desde la cómoda presunción de que esas cuestiones no nos afectan: a la vista de los estantes vacíos de los supermercados, examinamos la obra con cuidado, explorando las referencias que aporta la autora como si de un manual de supervivencia se tratase, buscando explicaciones y tratando de completar un puzle que tenía más piezas de las previstas. Y el título del libro también resulta bastante adecuado, puesto que las ciudades «engullen» más de tres cuartas partes de los recursos de la Tierra.

En mi frase inicial, he asumido que usted vive en una ciudad. Es lo más normal, sobre todo si se halla en uno de los países que llamamos desarrollados (en Europa, el 75 por ciento de la población es urbana). Los habitantes de esos lugares abandonaron el campo hace tiempo en busca de comodidades y, precisamente, de un flujo de alimentos previsible, a salvo de cosechas fallidas y otras inclemencias. El *Homo urbanus*, un término acuñado por Jeremy Rifkin en 2007, cuando se alcanzó un hito histórico: por primera vez, más de la mitad de la humanidad estaba viviendo en grandes zonas urbanas con al menos 10 millones de habitantes. Esta tendencia se ha consolidado y se espera que, en 2050, dos tercios de la población mundial habiten en las ciudades. Eso convierte a las urbes en una especie de grandes estómagos, cuyo diseño es uno de los principales temas que trata la autora. Y es que Carolyn Steel, arquitecta además de escritora, adapta su discurso para explicar el modo en que la recepción de los alimentos y la expulsión de los residuos han condicionado la estructura de nuestras ciudades.

El libro sigue la travesía que recorre la comida, desde sus lugares de producción hasta los mercados y supermercados, para llegar a la cocina y, por último, al plato que vemos en la mesa. Y luego explora el tramo final del recorrido, tapándose la nariz para mostrar que la comida, o lo que queda de ella, aún debe encontrar una salida digna. Las redes de saneamiento y los vertederos, sin ser la mejor solución, han servido hasta ahora para que las ciudades no se ahoguen en sus propias inmundicias. El texto concluye repasando las utopías de distintos visionarios, que demuestran que no existe la fórmula perfecta.

La visión histórica que permea la obra nos ayuda a comprender cómo ha evolucionado la compleja tarea de alimentar a las ciudades. La eficiencia económica se ha ido imponiendo hasta llegar a su máxima expresión, permitiendo que la industria alimentaria nos suministre aquello que

nuestros antepasados siempre anhelaron: comida barata y abundante. Todo el negocio alimentario está en manos de cárteles transnacionales que persiguen un único fin: maximizar sus beneficios. Así, si algo se produce y transporta es porque hay consumidores dispuestos a pagar por ello. Este peculiar mercado puede proporcionar, a las once de la noche de un día de diario, salmón ahumado de Noruega y arándanos cultivados en un entorno semiárido, si hay alguien que pague lo suficiente; en cambio, crea desiertos alimentarios allí donde abunda la población con bajo poder adquisitivo. La meta de este negocio no es cubrir nuestras necesidades alimentarias y lograr que comamos de forma sana y equilibrada, sino ser rentable. Si los alimentos saludables generan beneficios, entonces el sistema los proveerá.

La autora pretende que seamos conscientes de los numerosos e insospechados vericuetos que supone alimentar a la población mundial en el contexto de la globalización. La deriva de esta forma de entender la eficiencia «ha vuelto infinitamente más complejo aquello mismo que prometía más fácil: alimentar a las ciudades». La propia agricultura se está tornando irrelevante en el sector agroalimentario, lo que recuerda a una frase épica de *Una noche en la ópera*, cuando Groucho Marx le espeta a la señora Claypool: «Sus ojos, su garganta, sus labios, todo cuanto hay en usted me recuerda a usted, excepto usted». No menos esperpénticos resultan algunos de los hechos que rodean todo este negocio de la alimentación. Solo citaré aquí algunos, que podrían resultar graciosos si no fuese porque, en el fondo, lo que está en juego es nuestra seguridad alimentaria, un eufemismo de términos mucho más duros, como desabastecimiento o racionamiento.

Uno de los efectos colaterales de este mecanismo tan eficiente es la enorme simplificación de nuestras dietas. Pese a la sensación de esplendor y variedad que ofrecen los coloridos estantes de los supermercados, casi todo procede de unos pocos monocultivos que copan la superficie agrícola. Uno de ellos es el plátano, y en concreto la variedad Cavendish. Esta reemplazó a la Gros Michel, que constituía la principal reserva de plátano comercial hasta que un hongo acabó con ella. En un remoto bosque de la India se encontró el antecedente silvestre de la variedad Cavendish, pero hoy nos resultaría mucho más difícil afrontar una crisis parecida, puesto que hemos acabado con el 75 por ciento de la diversidad agrogenética.

Otra pega que podemos ponerle al sistema que hemos creado es su escasa eficiencia energética: para producir una caloría se necesitan diez, un dato que no sorprende demasiado cuando los alimentos recorren miles de kilómetros hasta llegar a su destino, amén de la energía invertida (en forma de maquinaria, fertilizantes, etc.) para obtenerlos. Por último, cabe destacar la enorme huella ambiental de este método de producción y distribución, de la que llevan tiempo alertando importantes organismos internacionales, como la FAO.

A los argumentos y pasajes de corte más técnico, se suman reflexiones de carácter filosófico y ético. Esta transición se aprecia en la segunda parte del libro, que nos invita a evaluar si todo este cambalache ha merecido la pena. Hemos de preguntarnos si somos más felices que nuestros antepasados, aunque pasemos menos hambre; si tiene sentido que tiremos un tercio de los alimentos, toneladas de ellos por culpa de su aspecto; o si es necesario producir más comida, considerando que hay 2000 millones de personas obesas.

La autora aprovecha los capítulos dedicados a la mesa y la cocina para proponer una solución o, al menos, un cambio de tendencia. Quizá sea aquí donde se haga más patente el sesgo que imprime su origen británico a la obra, que originalmente pretendía describir Londres a través de la comida. Steel considera que las (buenas) costumbres de cocinar, ir al mercado y compartir la comida con los amigos o la familia son ingredientes necesarios para conocer y apreciar la procedencia de los alimentos. Puede que en los países mediterráneos (y en otros), que se resisten, en parte, a la invasión de la comida rápida y al estilo de vida más individualista propio de las sociedades desarrolladas, aún sobrevivan esos vínculos que pueden reconectarnos con un mundo agrario más moderado y respetuoso con la naturaleza.

Aunque no estamos ante una obra enciclopédica ni exhaustiva (tampoco pretende serlo), constituye una muy buena aproximación al complejo negocio alimentario, y nos ayuda a comprender sus puntos fuertes y débiles. Tal vez esta sea una de las principales virtudes del libro, que nos incita a leer más sobre el tema. Yo animo al lector a que lo haga: no va a encontrar un momento histórico más oportuno.

Jaime Martínez Valderrama
Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio
Universidad de Alicante